



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

## MOŽNOSTI APLIKACE SYSTÉMŮ S AKUMULACÍ TEPLA V JADERNÉ ENERGETICE

APPLICATION POSSIBILITIES OF SYSTEMS WITH HEAT ACCUMULATION IN NUCLEAR  
POWER

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

Bc. LENKA SKLENÁŘOVÁ

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ MARTINEC Ph.D.

BRNO 2013



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Lenka Sklenářová

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Možnosti aplikace systémů s akumulací tepla v jaderné energetice**

v anglickém jazyce:

### **Application possibilities of systems with heat accumulation in nuclear power**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V jaderné energetice jsou aplikovány systémy, které využívají efektu fázové změny materiálu z pohledu akumulace tepla. Praktickým příkladem fázové změny materiálu jsou ledové kondenzátory využívané jako pasivní ochranný prvek v případě LOCA havárie. V tomto případě se jedná o pasivní prvek pouze z pohledu jeho okamžitého využití během havárie, neboť je nutné udržovat podmínky v ledovém kondenzátoru po celou dobu provozu jaderné elektrárny s přívodem elektrické energie.

Aplikace materiálu s fázovými změnami v daných teplotních podmínkách může být přínosné nejen jako náhrada ledu v ledových kondenzátorech, ale také jako možnosti zabezpečit havarijní dochlazování bazénu s vyhořelým palivem. K aplikaci těchto materiálů je však nezbytné provést základní rozbor situace pro standardní a případně havarijní provoz jaderných elektráren a také navrhnout konkrétních technických řešení aplikace.

Cíle diplomové práce:

Technická řešení použití ledních kondenzátorů ve stávajících tlakovodních jaderných elektrárnách.

Technická řešení systémů chlazení bazénů s vyhořelým palivem.

Zpracování přehledu materiálů s vhodnými parametry pro akumulaci tepla principem fázové přeměny.

Technický návrh možnosti kondenzace páry uvolněné při havárii typu LOCA přes kondenzátor.

Technický návrh možnosti havarijního dochlazování bazénů s vyhořelým palivem pomocí akumulace tepla.

Posouzení technických návrhů z pohledu jaderné bezpečnosti.

Seznam odborné literatury:

Principles of heat and mass transfer. 7th ed., international student version. Singapore: John Wiley, c2013, xxiii, 1048 s. ISBN 978-0-470-64615-1.

Handbook of phase change: boiling and condensation. 7th ed., international student version. Philadelphia: Taylor, 1999, xlvii, 738 s. ISBN 15-603-2634-4.

NEIL E. TODREAS, Neil E. Mujid S. Nuclear systems: boiling and condensation. 2. printing. New York [etc.]: Hemisphere Publ. Comp, 1989, xlvii, 738 s. ISBN 15-603-2051-6.

U. Gross, Ch. Philipp, Conjugated shear stress and Prandtl number effects on reflux condensation heat transfer inside a vertical tube, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 49, Issues 1–2, January 2006, Pages 144-153, ISSN 0017-9310

Databáze publikací Mezinárodní agentury pro atomovou energii.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Martinec, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 9.11.2012

L.S.

---

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt:**

Tato diplomová práce se zabývá aplikací systémů s akumulací tepla v jaderné energetice; respektive v jaderných elektrárnách. Jedná se především o pasivní havarijní systémy, které mají za úkol akumulovat uvolňované teplo v aktivní zóně reaktoru a bazénech s vyhořelým jaderným palivem v případě projektové nebo nadprojektové havárie. Konkrétním příkladem akumulace tepla je kondenzace páry vzniklé během LOCA havárie (loss of coolant accident). Únik páry z primárního okruhu zvyšuje tlak uvnitř kontejnmentu a je nutné ho kondenzací páry snížit. Diplomová práce se zabývá teoretickou náhradou ledového kondenzátoru, který je nainstalován jako pasivní bezpečnostní prvek v několika jaderných elektrárnách. Náhrada je spojena s volbou jiného alternativního materiálu s teplotou tavení (pro akumulaci tepla) při teplotách bližších provozním podmínkám provozovaných jaderných elektráren.

V další části diplomové práce je řešena akumulace tepla v bazénech s vyhořelým palivem v případě selhání všech chladicích systémů.

## **Klíčová slova**

Ledový kondenzátor, parafínový kondenzátor, materiály s fázovou přeměnou, LOCA havárie, bazén s vyhořelým palivem, akumulace tepla

## **Abstract:**

This dissertation covers the application of heat accumulation systems in nuclear power engineering, namely in nuclear power plants. It is mainly a case of passive emergency systems, whose task is to accumulate the heat produced in the reactor's active zone and in spent fuel pools during DBA (design-basis accidents) or beyond DBA. A particular example of heat accumulation is steam condensation after LOCA (loss of coolant accident). The primary circuit steam leakage increases containment pressure and has to be decreased by the steam condensation. This thesis deals with a theoretical substitute for ice condensers, which are used as a passive safety measure in some nuclear power plants. The substitute involves a choice of an alternative material, whose melting temperature (for heat accumulation) is closer to nuclear power plant operating temperatures. The other part of the dissertation discusses heat accumulation in spent fuel pools in case of all cooling systems failure.

## **Keywords:**

Ice Condenser, Paraffin Condenser, Phase Change Material, LOCA, Spent Fuel Pool, Accumulation of Heat



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

SKLENÁŘOVÁ, L. *Možnosti aplikace systémů s akumulací tepla v jaderné energetice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. Vedoucí práce Ing. Jiří Martinec, Ph.D.





## **ČESTNÉ PROHLÁŠNÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 24.5.2013

.....  
Podpis



## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Jiřímu Martincovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Také bych ráda poděkovala panu Ing. Hugovi Šenovi za pomoc při modelování v programu Ansys.



## Obsah

1	Úvod.....	13
2	Bezpečnost.....	15
2.1	Aktivní havarijní systém.....	16
2.2	Pasivní havarijní systémy.....	16
2.3	LOCA.....	17
2.4	Kontejnment.....	19
3	Kontejnment s ledovým kondenzátorem.....	21
3.1	Průběh LOCA havárie v kontejnmentu s ledovým kondenzátorem:.....	24
4	Parafínový kondenzátor.....	26
4.1	Volba materiálu.....	28
4.2	Výběr parafínu.....	30
4.3	Výpočet entalpie.....	31
5	Konstrukce kondenzátoru.....	34
5.1	Volba materiálu trubek.....	34
5.2	Počet a geometrické uspořádání trubek.....	34
6	Rozbor výpočtu parafínového kondenzátoru.....	36
6.1	Kondenzace.....	36
6.2	Únik chladiva z primárního systému.....	37
6.2.1	Výpočet teploty a tlaku.....	38
6.3	Filmová kondenzace.....	40
6.3.1	Protiproud.....	41
6.3.2	Souproud.....	44
6.4	Výpočet množství zkondenzované páry.....	49
7	Skladování vyhořelého jaderného paliva.....	51
8	Bazén s vyhořelým palivem.....	52
8.1	Rozdělení BSVP.....	53
8.1.1	BSVP vně kontejnmentu.....	53
8.1.2	BSVP uvnitř kontejnmentu.....	54
8.2	Bezpečnostní prvky bazénů s vyhořelým palivem.....	55
8.2.1	Systém bazénů.....	55
8.2.2	Chlazení BSVP.....	56
9	Havarijní dochlazování bazénů s vyhořelým palivem.....	59
9.1	Nechlazený bazén.....	60
9.2	Chlazený bazén.....	62
10	Posouzení technických návrhů z pohledu jaderné bezpečnosti.....	64
11	Závěr.....	66
12	Zdroje.....	67
13	Seznam použitých symbolů.....	71
14	Přílohy.....	73



## 1 Úvod

Mezi nejefektivnější způsoby získávání elektrické energie patří jaderná energetika. Jedná se o složitý způsob, jak přetransformovat tepelnou energii na kinetickou a následně na požadovanou elektrickou energii. Aby bylo možné vyloučit rizika, která jsou spjata s touto výrobou energie, je nutné, aby jaderná bezpečnost byla na vysoké úrovni a splňovala všechny bezpečnostní kritéria provozováním jaderných elektráren.

Mezi nejzákladnější zákonodárné dokumenty starající se o dodržování jaderné bezpečnosti patří tzv. Atomový zákon (Zákon č. 18/1997 Sb.), který ustanovuje nároky na obsluhu jaderných zařízení a hlavně na mírové využívání jaderné energie při činnosti jaderných zařízení.

Dozor při využívání jaderné energie a ionizujícího záření, stejně tak i státní správu vykonává Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB). Do jeho oblasti vlivu zejména patří:

- Povolování výkonu činnosti podle Atomového zákona (č. 18/1997 Sb.)
- Výkon státního dozoru nad jadernou bezpečností, jadernými položkami, fyzickou ochranou jaderných zařízení, radiační ochranou a havarijní připraveností v prostorách jaderného zařízení nebo pracoviště se zdroji ionizujícího záření.
- Sledování stavu ozáření obyvatelstva a pracovníků se zdroji ionizujícího záření.

A mnohé další [1].

SÚJB zastupuje Českou republiku jako jediný státní úřad i v mezinárodní agentuře pro jadernou bezpečnost.

Další organizací dohlížející na dodržování mírového využívání jaderné energie je Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE, též také International Atomic Energy Agency – IAEA).

Tato diplomová práce pojednává o možnostech aplikace materiálů s fázovou přeměnou (PCM), jejichž teplota změny skupenství z pevné do kapalně fáze je vyšší než běžná provozní teplota v jaderných elektrárnách. Konkrétní požadovaná teplota tavení je dána místem případné aplikace PCM. Demonstračním materiálem v případě diplomové práce je uvažován parafin, který se svými akumulačními a manipulačními vlastnostmi velmi vhodně umožňuje experimentální činnost spojenou s výzkumem akumulaci tepla v případě LOCA havárie [2].

Volba konečného PCM při případné aplikaci v jaderných elektrárnách nemusí vycházet jen z parafinů, neboť existuje celá řada jiných materiálů s velmi podobnými vlastnostmi.

Kapitola 2 a 3 se zabývá bezpečností elektráren se zaměřením na průběh a na likvidaci LOCA havárie, dále je také zmíněna i problematika ochranných obálek. Následně se zaměříme na parařinový kondenzátor, jako na možnou náhradu ledových kondenzátorů, a to hlavně z důvodu provozních nákladů a případně i kontroly stavu PCM během provozu.

Ke konstrukci parařinového kondenzátoru je nutné zvolit správný materiál parařinu podle potřeby teploty tání a trubek podle vodivosti použitých v návrhu výměníku tepla pro kondenzaci páry (viz kapitola (4.)).

Kapitola 6 se bude zabývat detailněji kondenzací páry, která se při LOCA havárii v kontejnmentu uvolní a následně proudí v navrženém výměníku tepla.

V následujících kapitolách se budeme zabývat další možností aplikace PCM materiálů, a to hlavně v souvislosti s chlazením bazénu s vyhořelým palivem (BSVP), kde jsou skladovány použité palivové soubory. Použité palivové soubory jsou neustálým zdrojem tepla o určitém výkonu, který se postupně snižuje na míru akceptovatelnou k trvalému uložení. Jestliže by došlo k náhlému selhání všech chladicích okruhů v BSVP, tak by voda v bazénu začala postupně zvyšovat svoji teplotu až do bodu varu. Příkladem této problematiky může být dokumentovaná havárie v jaderné elektrárně Fukušima Daiči, kdy došlo k vypaření chladicí vody v BSVP a následně roztavení vyhořelého paliva za produkce nebezpečného vodíku. Tento fyzikální děj zvyšování teploty vody v BSVP je možné oddálit vhodnou aplikací parařinu nebo jiného použitelného PCM materiálu za ocelovou stěnu vytvářející bazén, případně do bazénu.

Tato diplomová práce vznikla hlavně na základě výzkumné aktivity ve spolupráci s Texas A&M University ze Spojených států amerických, která je podložena projektem KONTAKT II - Výzkum a charakteristika materiálů akumulace tepla v kontejnmentech lehkovodních jaderných reaktorů při efektivním snižování vnitřního tlaku během havárií (LH12063).

Americká univerzita se zabývá studiem jednotlivých materiálů, které by byly vhodné pro akumulaci tepla, a také se věnují akumulaci tepla v případě bazénů s vyhořelým palivem.

Naopak česká strana se zaměřila na návrh kondenzačního zařízení.

Tato diplomová práce navíc navazuje na diplomovou práci Možnosti zvyšování jaderné bezpečnosti pro koncept pasivního systému s ledními kondenzátory v případě LOCA havárie, kterou vytvořil Ing. Zbyněk Pluška [3].



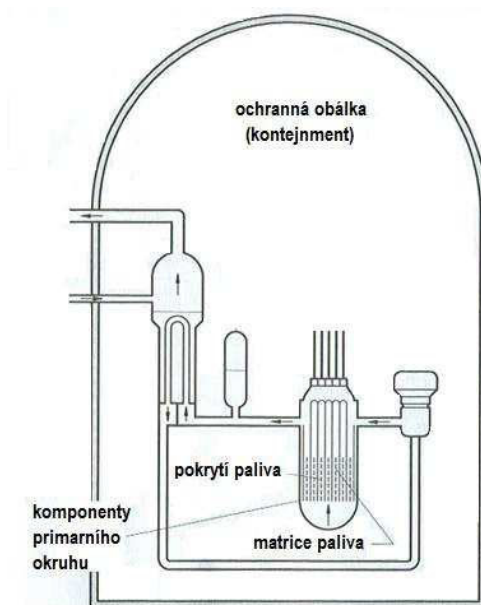
## 2 Bezpečnost

Jaderná bezpečnost je definována zákonem č.18/1997 Sb. jako „Stav a schopnost jaderného zařízení a osob obsluhujících jaderné zařízení, má zabránit nekontrolovanému rozvoji štěpné reakce nebo nedovolenému úniku radioaktivních látek nebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezovat následky nehod.“. Tuto definici lze v souladu s doporučením MAAE chápat jako stav a schopnost plnit tři základní funkce:

1. Bezpečné odstavení reaktoru a bezpečný průběh odstávky reaktoru za všech situací souvisejících s odstavením jaderného bloku.
2. Odvod veškerého tepla z aktivní zóny reaktoru za všech situací souvisejících s provozem i odstávkami jaderného bloku. (Vychladit reaktor a odvádět zbytkové teplo).
3. Zamezení úniku radioaktivních látek a ionizujícího záření do okolí nad stanovenými mezními hodnotami (limitami) za všech situací souvisejících s provozem i odstávkami jaderného bloku.

Možnému úniku radioaktivních látek do okolí brání čtyři bariéry (viz Obr. 2.1):

- matrice paliva
- pokrytí paliva (zirkoniové trubičky)
- komponenty primárního okruhu
- kontejnment.



Obr. 2.1 Čtyři bariéry [4]

## 2.1 Aktivní havarijní systém

Aktivní havarijní systémy jsou využívány k dochlazování a dodávce roztoku kyseliny borité do aktivní zóny reaktoru, která absorbuje neutrony ze štěpení jader izotopu  $^{235}\text{U}$  (případně jiných), čímž zamezuje udržitelnost samovolné štěpící reakce. Aktivní systémy jsou spouštěny operátorem anebo počítačovým systémem, proto pro svoji funkčnost potřebují zdroj energie. Jako externí zdroj energie je využívána elektřina, která je vyrobena přímo v JE. Jestliže by došlo k výpadku elektrické energie, jaderná elektrárna má diesel – generátorové stanice, které jsou připraveny k okamžitému spuštění a výrobě elektřiny pro pohon aktivních systémů. Podle konkrétní jaderné elektrárny havarijním zdrojem elektřiny může být i jiné řešení – třeba elektřina z vodních elektráren napojených na havarijní okruh.

Mezi největší nevýhody aktivních bezpečnostních systémů patří:

- závislost na vnějších zdrojích energie
- možnost selhání zařízení či lidského faktoru

Naopak mezi výhody tohoto zařízení se řadí:

- jsou schopny chladit bezpečně celý primární okruh (sprchový systém), ale i reaktor
- dokážou zajistit většinu požadovaných funkcí pomocných systémů (olejové systémy, HCC...)

## 2.2 Pasivní havarijní systémy

Pasivní systémy slouží například ke snížení tlaku uvnitř kontejnmentu, při úniku chladiva primárního okruhu i při výpadku dodávky elektrického proudu. Jsou tedy netečné vůči lidským chybám či vnějším vlivům.

Tyto systémy využívají základních fyzikálních zákonů (gravitace, přirozená konvekce). Úkolem je vytvořit a udržet podkritičnosti aktivní zóny, ve spolupráci s aktivními systémy dochlazovat reaktor, co nejvíce snížit pravděpodobnost reakce pokrytí palivového článku s chladivem a zabránit roztavení paliva (např. ECCS).

Mezi pasivní systémy patří havarijní tyče, které se samovolně zasunou do aktivní zóny vlivem gravitace, dále dvojí kontejnment (jeho funkcí je pasivní chlazení vnitřní ocelové obálky přirozeným oběhem vzduchu) a i ledový kondenzátor, který vyvinula americká společnost Westinghouse [5].

Mezi největší výhody pasivních systémů patří:

- Funkčnost na základě fyzikálních zákonů.
- Funkčnost bez zásahu operátora.

Naopak mezi nevýhody se řadí:

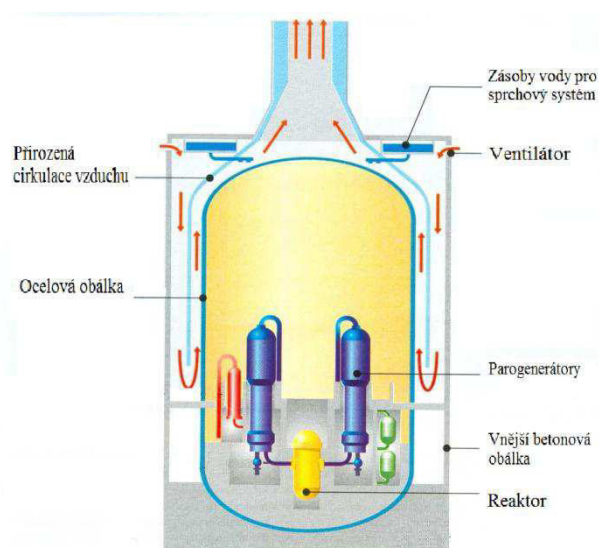
- Problém s testováním systémů

## 2.3 LOCA

LB LOCA (Large break Loss of Coolant Accident) je zkratkou havárie, která je typická ztrátou chladicí kapaliny z primárního okruhu. Tato havárie nastává případně v případě prasknutí potrubí primárního okruhu („gilotinové roztržení“ – teoreticky je potrubí je obnažené v celém svém průřezu a jedná se o největší unik chladiva. V reálném případě se spíše bude jednat o trhlinu). Pravděpodobnost výskytu LB LOCA je udávána v rozmezí  $10^{-4} - 10^{-5}$  za rok. Tato pravděpodobnost analyzuje riziko selhání zařízení pomocí pravděpodobnostního výskytu iniciační a následujících událostí. Pravděpodobnost výskytu nehod se hodnotí pomocí tzv. stromu poruch [6], [7].

Každá jaderná elektrárna má jiný systém jak se vypořádat s LOCA havárií. Například některé těžkovodní reaktory (PHWR) mají vakuovou budovu se sprchovým systémem, který vzniklý přetlak a páru eliminuje.

Další, například elektrárny s reaktorem AP1000 (AP600), obsahují jako bezpečnostní prvky pouze pasivní havarijní systémy (např. hydroakumulátory, chlazení reaktoru (CMT), či zásobní nádrže s vodou a dvojitý kontejnment). Jestliže by došlo k havárii LOCA, byl by vnitřní plášť chlazen vodou z horní nádrže. Díky přirozené cirkulaci vzduchu a chlazení ocelové obálky z vnější strany je umožněna kondenzace páry a snižování tlaku uvnitř ochranné obálky. Kondenzát, který vzniká na stěnách, je shromažďován v zásobních nádržích (Obr. 2.2) [8].



Obr. 2.2 Bezpečnostní prvky AP 600

Reaktory generují tepelnou energii, která je pomocí média převáděna do kinetické a následně elektrické podoby. Jestliže dojde ke snížení nebo ztrátě větší části chladiva, přejde do činnosti nouzový vypínací systém a zastaví štěpné reakce. Jestliže by všechny chladicí systémy přestaly fungovat, došlo by ke zvýšení teploty paliva a následnému poškození reaktoru (například v podobě roztavení dna).

Z hlediska úniku radioaktivních látek je důležité, aby alespoň dvě ze čtyř bariér si zachovaly svoji funkci (matrice, pokrytí, komponenty primárního okruhu, kontejnment). Aby byly dodrženy bezpečnostní požadavky MAAE, musí být uplatněn „Princip ochrany do hloubky“. Jedná se o doplnění a prolínání fyzických bariér a úrovní ochrany: [5]

1. Předcházení odchylkám od normálního provozu.
2. Identifikace a náprava událostí abnormálního provozu.
3. Kompenzační zásahy a odpovídající nápravná opatření, vedoucí k odvrácení rozvoje, nebo ke zvládnutí havarijních podmínek projektovými prostředky, k zachycení úniků radiace a radionuklidů a omezení důsledků jejich úniků, pokud k nim dojde.
4. Zvládnutí nadprojektových nehod včetně těžkých havárií.
5. Opatření na ochranu pracovníků jaderné elektrárny a opatření na ochranu osob a životního prostředí při radiační nehodě.

### Průběh LOCA havárie:

Tato havárie, jak už bylo zmíněno v této kapitole výše, je způsobena prasknutím potrubí v primárním okruhu (nebo jiné komponenty). Následně jsou do

reaktoru zasunuty havarijní tyče, díky kterým se zastavuje štěpná reakce, toto je doprovázeno snížením výkonu a následným oddálením varu (chladiwa, moderátoru).

Jestliže by nedošlo ke chlazení, začala by voda postupně vřít a vypařovat se. Následně by teplota paliva stoupala až k teplotě tání. Nakonec po odhalení aktivní zóny a ztrátě chlazení by nastalo její roztavení.

## 2.4 Kontejnment

Kontejnment patří mezi významné bezpečnostní bariéry a tvoří hranici hermetické zóny. V kontejnmentu je situován celý primární okruh a další bezpečnostní zařízení (sprchové systémy, katalytické rekombinároty<sup>1</sup>...). Ochranná obálka má za úkol zamezit úniku štěpných produktů do okolí, ale je také navržena tak, aby ochránila primární okruh před vnějšími vlivy (pád letadla, výbuch, vichřice...) [9].

Uvnitř kontejnmentu je umístěn bazén použitého paliva, takže i výměna paliva je prováděna bezpečně v uzavřeném prostoru. Vstup do ochranné obálky je umožněn díky dvěma hermetickým vstupům, které spojuje vyrovnávací komora (např. JE Temelín) [5].

Ochranné obálky lze rozdělit do různých skupin podle toho, jak eliminují havárii, či z čeho jsou postavené.

Kontejnmenty jsou betonové, ocelové anebo betonové s ocelovou výstelkou. Jestliže by došlo k havárii a následnému zvýšení tlaku a teploty, lze tyto následky eliminovat dvěma způsoby. První způsob je založen na pasivním procesu; kontejnment je natolik velký, že vydrží vzniklé tlaky a teploty do té doby, než se opět vrátí do bezpečných hodnot. Druhý způsob je založen na aktivním chlazení; kde je vzniklá pára hnána přes chladicí medium anebo je spuštěn sprchový systém.

### Typy kontejnmentů: [10]

#### BWR

##### • Mark I

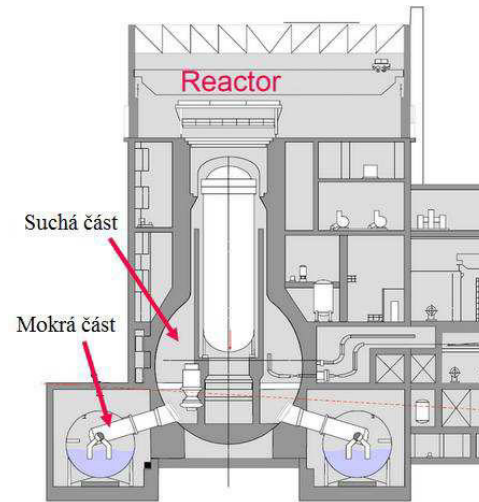
- Jedná se o betonový nebo ocelový kontejnment s funkcí pasivního snižování tlaku. Ochranná schránka se skládá ze dvou částí. Suché („drywell“), která obsahuje tlakovou nádobu a mokré („wetwell“), která je

---

<sup>1</sup> Katalytické rekombinároty slouží ke snižování obsahu vodíku v ovzduší. Zařízení využívá schopnost vodíku vázat se na některé druhy kovů, např. palladium nebo platinu.

naplněna vodou a obklopuje suchou část (viz Obr. 2.3). V případě havárie je přes mokrou část hnána horká pára, která následně zkondenzuje.

– Tento typ byl například využit v JE Fukushima



Obr. 2.3 Mark I [11]

- Mark II

- Má obdobnou konstrukci jako Mark I, jen se jedná o zjednodušenou a zefektivněnou verzi.

- Mark III

- Tento typ má zkonstruovanou větší mokrou část a navíc ještě kolem suché části je postavena další obálka, která poskytuje větší ochranu.

### Large Dry PWR

- Jedná se o kontejnment s ocelovou nebo betonovou schránkou s aktivním chlazením ve formě sprchovacích systémů. Pevné základy kontejnmentu slouží jako „zachytávač“ případné roztavené aktivní zóny.

### Subatmospheric PWR

- Uvnitř kontejnmentu se udržuje stálý podtlak (cca 35 kPa), a proto se díky tomu se nic z vnitřního prostředí nedostane ven. Jedná se o složitější systém udržování podtlaku, ale výhodou je rychlé zjištění jakýchkoliv netěsností. Navíc nižší tlak slouží jako záloha případnému zvýšení vnitřního tlaku vůči tlaku okolí.

### Ledový kondenzátor PWR

- Tímto tématem se budeme zabývat v následujících kapitolách.

### 3 Kontejnment s ledovým kondenzátorem

Tento systém vyrovnávání tlaku při havárii LOCA vyvinula americká firma Westinghouse. První jadernou elektrárnou s tímto patentem se stala DC Cook v roce 1975. Nyní je instalována v devíti amerických (DC Cook 1, 2, Sequoyah 1, 2, Catawba, McGuire, Three Mile Island, Watts Bar, Indian Point), dvou japonských (Oi 1, 2) a jedné finské elektrárně s reaktory VVER 440 (Loviisa) [12].

Kontejnmenty s ledovými kondenzátory mají sekundární železobetonovou obálku a tenký primární ocelový plášť s polovičním objemem, než jaký je u velkých suchých kontejnmentů. Podobně i projektovaný tlak je velmi nízký, pohybuje se kolem 70 – 105 kPa. Na okraji ochranné obálky je umístěna tepelně izolovaná prstencová místnost, ve které jsou umístěny koše s ledem (zhruba 1 000 tun ledu). Koše jsou konstruovány tak, aby dovozovaly průchod vzniklé páry. Led je vyráběn ve speciálním mrazicím zařízení a udržován v tuhé fázi pomocí chladicího systému [13].

#### Sestavení kontejnmentu (viz Obr. 3.1)

Model kontejnmentu vychází z výkresu Patentu 3 726 759 [14] a jeho členění je následovné:

##### 1. Reaktor

- Jedná se o zařízení, kde se uvolněná energie z jaderného štěpení přeměňuje na tepelnou energii. Vytvořené teplo odvádí voda spojovacím potrubím (5.) do parogenerátoru (2.).

##### 2. Parogenerátor

- Parogenerátor je tepelný výměník, kde horká voda protéká tenkými trubkami, ty jsou ponořené ve vodě sekundárního okruhu. Teplo z primární vody, která se ohřívá v reaktoru, je předáváno vodě sekundární, z které se následně generuje sytá pára, ta slouží jako pohon pro parní turbínu.
- Dále parogenerátor plní i funkci rozhraní mezi primárním a sekundárním okruhem.
- Počet a položení parogenerátorů se liší podle typu reaktorů (u elektráren ruského typu se vyskytují horizontální PG a jejich počet se liší podle typu – VVER 440 – 6 PG, VVER 1000 – 4 PG, pak u elektráren západního typu jsou využívány vertikální parogenerátory).

3. Hlavní cirkulační čerpadlo

- HCC je umístěno na studené větvi a jejich počet závisí na počtu cirkulačních smyček.
- Hlavní funkcí HCC je zajištění cirkulace chladiva primárního okruhu v množství, které odpovídá tepelnému výkonu reaktoru.

4. Ledový kondenzátor

- Detail s popisem kondenzátoru je na Obr. 3.2.

5. Spojovací potrubí

6. Samovýklopná dvířka

- Tato dvířka se otevřou, jestliže tlak v kontejnmentu stoupne na 0,17 MPa.

7. Spodní box

- Zde vzniká riziko výbuchu vodíku, jedná se o menší prostor, kde může koncentrace více stoupnout. Proto zde musí být nainstalovány katalytické rekombinároty.





Obr. 3.1 Kontejnment s ledovým kondenzátorem

Velkou nevýhodou ledového kondenzátoru jsou jeho velké nároky na energetický provoz chladicího systému, to znamená nutnost udržení ledu v tuhém

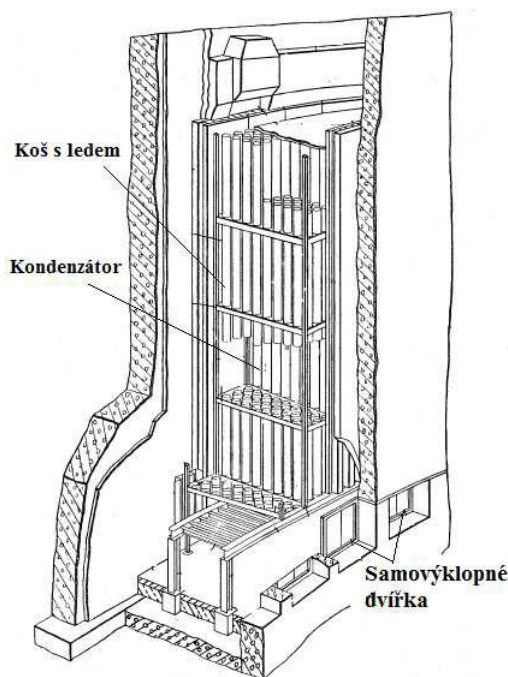
stavu. Další nevýhodou je i zvýšení rizika vodíkového spalování, neboť objem kontejnmentu je o polovinu menší než u jiných elektráren, pak tedy zde může snadněji dosáhnout výbušné koncentrace. Příkladem může být havárie v Three Mile Island v 1979.

Aby se předešlo výbuchu vodíku, je nutné instalovat vodíkové zapalovače, ty zajistí spalování vodíku v kontrolovaném poměru, dříve než dosáhne výbušné koncentrace. Dále také katalytické rekombinároty, které spalují vodík bezplamenným způsobem [15].

### 3.1 Průběh LOCA havárie v kontejnmentu s ledovým kondenzátorem:

Vznik LOCA havárie – nastane gilotinové protržení primárního potrubí a chladivo se přemění v páru.

Odvod páry – samovýklopné dveře, jsou otevřeny v důsledku vzniklého tlaku. Těmi následně vzniklá pára odchází do kondenzátoru (viz Obr. 3.2). Tato dvířka jsou projektována na tlak 0,17 MPa.



Obr. 3.2 Detail kondenzátoru[14]

Kondenzace páry – pára proudí zespodu skrz koše s ledem (jedná se o směs s kyselinou boritou), tím se ochladí a zkondenzuje, zároveň s tím se led rozpouští.

Forma ledu není přesně známa, jedná se patent, který si Westinghouse střeží, ale uvažuje se o možné podobě ve tvaru kuliček anebo ledové tříště. Následná směs vzniklá zkondenzovanou párou a roztátým ledem je odváděna do nádrží umístěné ve spodní části kontejnmentu.

Pokračování LOCA havárie – další potřebné chlazení je zajištěno sprchovým systémem (ECCS). Voda je nejprve odebírána ze zásobníků a až poté ze spodní nádrže s kondenzovanou směsí.

[9] [16][17]

Srovnání kontejnmentu s ledovým kondenzátorem s VVER (V-187) a PWR (N4 - Francie): [18]

	Ledový kondenzátor	PWR (N4)	VVER (V – 187)
Tepelný výkon [ $\text{MW}_t$ ]	3 250	4 300	3 200
Dovolený přetlak kontejnmentu [kPa]	70	430	460
Vnitřní objem [ $\text{m}^3$ ]	51 400	87 300	79 800

Z této tabulky je patrné, že přetlak, na který je kontejnment s ledovým kondenzátorem projektovaný, je v porovnání s ostatními velmi malý.

Stejně tak i vnitřní objem je skoro poloviční, to představuje velkou výhodu v ušetření materiálu při stavbě.

## 4 Parafínový kondenzátor

Mezi největší nevýhody ledového kondenzátoru patří:

- Velmi vysoké provozní náklady, které vznikají hlavně proto, že udržet vodu v ledové fázi je velmi energeticky náročné.
- Navíc i projektový tlak je velmi nízký, pohybuje se kolem 70 – 105 kPa.

Naopak mezi jeho výhody patří:

- Kontejnment je o polovinu menší než jiné kontejnmenty, což znamená velkou úsporu materiálu a i financí na stavbu.
- Led, který se rozpustí, stejně tak i zkondenzovaná pára se dají dále využít do sprchového systému.

V této kapitole budeme hledat materiál, který by eliminoval některé nevýhody ledového kondenzátoru a zároveň by akumulace tepla byla vyšší.

### Akumulace tepla:

Akumulaci tepla lze dělit podle akumulační látky a využití fyzikálních vlastností:

- S využitím citelného tepla [19]
  - Tato akumulace využívá tepelnou kapacitu látky v daném rozsahu teplot. Měrná tepelná kapacita není konstantní počáteční a koncové teplotě. Matematicky by se tato akumulace dala zapsat následovně:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} V \rho c dt = V \rho c (t_2 - t_1), \quad 4.1$$

kde  $Q$  [J] je teplo

$V$  [m<sup>3</sup>] značí objem akumulační látky

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] označuje hustotu

$c$  [J/kg K] je měrná tepelná kapacita pracovní látky

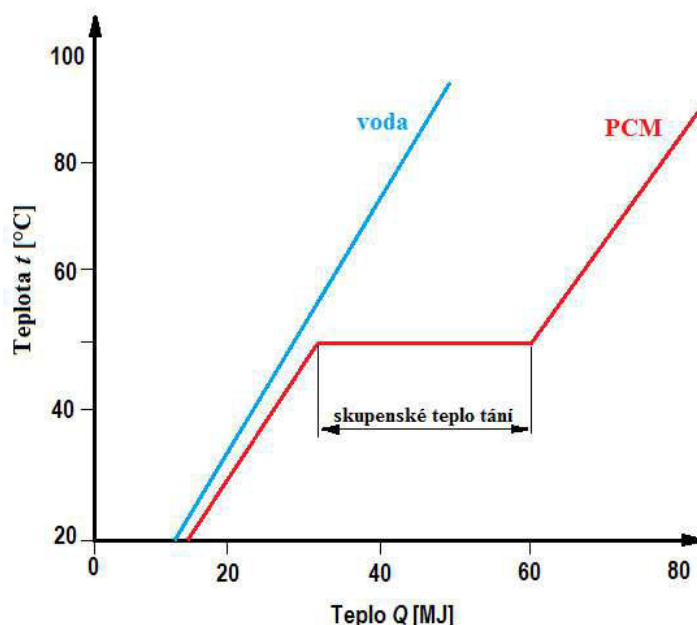
$t_1, t_2$  [°C] označují teploty na začátku a na konci akumulace tepla

- Těto akumulace využívá ledový kondenzátor, kde pracovní látkou je zmrzlá voda, která disponuje velkou tepelnou kapacitou (4,18 kJ/kg K) a zároveň je i levná.

- S využitím termochemických reakcí
  - Endotermická reakce je děj, při kterém spotřebováváno teplo. Aby reakce mohla probíhat, je nutné dodávat teplo, jestliže není dodáváno, tak si její reakce odebere z okolního prostředí.
- S využitím latentního tepla
  - Tato akumulace je založena na využití latentního tepla (energie, kterou je potřeba dodat látce pro změnu fáze) a tepelné kapacity látky. Látky, které mění látkové skupenství a tím přijímají nebo uvolňují teplo, se nazývají látky s fázovou přeměnou (PCM). Matematicky lze tuto akumulaci zapsat touto rovnicí:

$$Q = \rho_{PCM,t} V c_{PCM,t}(t_z - t_1) + \rho_{PCM,t} V l_{PCM} + \rho_{PCM,k} V c_{PCM,k}(t_2 - t_z), \quad 4.2$$

kde  $\rho_{PCM,t}$  [kg/m<sup>3</sup>] znázorňuje hustotu PCM látky v tuhém stavu  
 $\rho_{PCM,k}$  [kg/m<sup>3</sup>] označuje hustotu PCM látky v kapalném stavu  
 $c_{PCM,t}$  [J/kg K] značí měrnou tepelnou kapacitu v tuhém stavu  
 $c_{PCM,k}$  [J/kg K] označuje měrnou tepelnou kapacitu v kapalném stavu  
 $l_{PCM}$  [J/kg] je měrné skupenské teplo  
 $t_z$  [°C] označuje teplotu, při které dochází ke změně skupenství



Obr. 4.1 Srovnání akumulace tepla s využitím citelného a latentního tepla [20]

## 4.1 Volba materiálu

Nyní se budeme zabývat výběrem alternativního materiálu, který by mohl být použit do kondenzátoru místo ledu.

Jak jde z předchozí kapitoly (4) patrné, akumulace s využitím latentního tepla je vhodnější než s využitím tepla citelného. Proto využijeme pro náš zkušební kondenzátor PCM materiál.

Kritéria k výběru PCM:

Termické vlastnosti:

- Velká tepelná vodivost v kapalně i tuhé fázi
- Vysoké měrné skupenské teplo tání
- Malé objemové změny (Materiál bude v uzavřeném prostoru a nebude mít možnost se někam rozpínat)

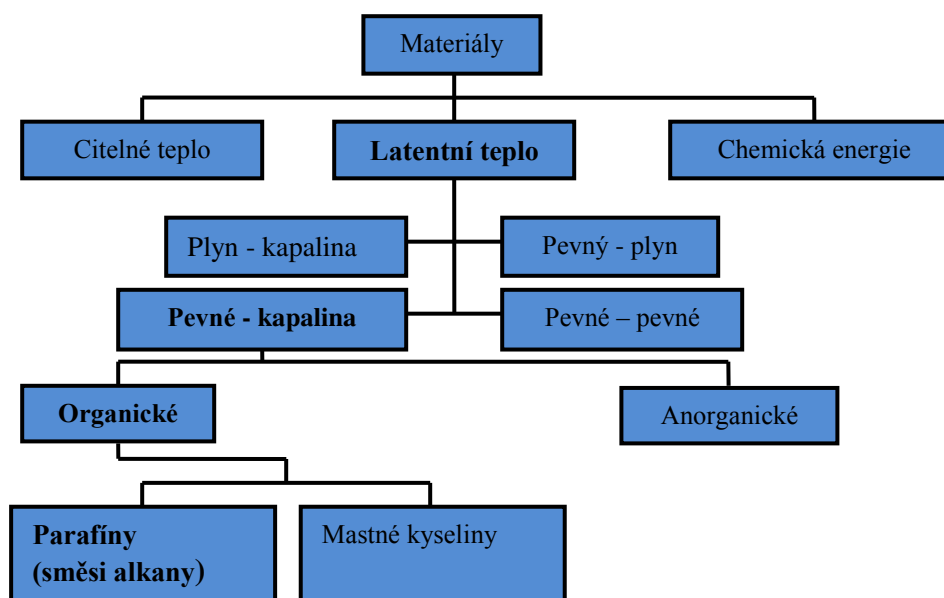
Chemické vlastnosti:

- stabilita
- netoxické, nekorozivní
- nehořlavé, nevýbušné

Ekonomické vlastnosti:

- levné, snadno dostupné

Rozdělení materiálů [21]



### **Anorganické látky**

- Jedná se o látku, která neobsahuje uhlík, ale naopak jeden nebo více atomů kovu.
- Mezi typické anorganické sloučeniny patří například: soli, kovy a slitiny (železo, měď) a nekovové prvky (křemík)

Výhody:

- dobrá fázová změna entalpie
- dobrá tepelná vodivost
- vysoké měrné skupenské teplo tání
- není hořlavý
- je levný

Nevýhody:

- korozivní
- fázová separace
- fázová segregace, bez termické stability
- velká změna objemu
- přítomnost H-můstků
- při vyšších teplotách se rozkládají
- 

Ačkoliv anorganické látky mají dobrou tepelnou vodivost a jsou nehořlavé, hodily by se jako alternativní látka do kondenzátoru hlavně díky tomu, že jsou korozivní, což znamená velký problém. Proto je musíme prohlásit za nevhodné.

### **Organické látky**

- Organické látky jsou hlavně na bázi uhlíku, tedy pokud obsahují jeden nebo více atomů.

Výhody:

- nejsou korozivní, ani toxický
- recyklovatelný
- vysoké měrné skupenské teplo tání
- chemická a termická stabilita

Nevýhody:

- malá fázová změna entalpie
- malá tepelná vodivost v pevném stavu
- hořlavý
- vysoké změny objemu při změně skupenství

- Organické látky dále dělíme na sloučeniny s parafínem a bez parafínu, jako například estery, vyšší mastné kyseliny a glykoly...
- Největší nevýhodou organických sloučenin bez parafínu je jejich vysoká cena a hořlavost.

Hlavně díky své nekorozivnosti a netoxicitě jsou organické látky vhodnější látkou než anorganické.

		Teplota tání [°C]	Tepelná kapacita [kJ/kg]	Tepelná vodivost [W/mK]
Organické látky	Parafín	55 - 59	178	0,2
Anorganické látky	Gallium	29,7	25,86	40,6
	Sádra	800-900		0,35

Tab. 4.1 Tabulka srovnání vybraných vlastností u organických a anorganických materiálů

Proto se zaměříme na organické látky a to především na sloučeniny s parafínem, které mají velké latentní teplo, dobrou teplotu tání a nejsou drahé.

Parafíny jsou někdy chybně označovány jako vosky. Parafíny jsou směsí vyšších nasycených alkanů, kdežto vosky jsou estery vyšších mastných kyselin a nějakého alkoholu.

V současné době Americká univerzita přišla na mnohem lepší alternativní vzorek než je parafín. Jedná se o sloučeninu sodium acetat trihydrát, který je u nás známý jako „horký led“. Jeho největší výhodou je nehořlavost a lepší vlastnosti (vyšší teplota tání, vyšší měrná tepelná kapacita). Naopak nevýhoda tohoto materiálu je vyšší cena.

## 4.2 Výběr parafínu

Výrobou parafínu se zabývá několik světových firem: [22]

Firma	rozmezí teplot
RUBITHERM	-3 °C to 100 °C
Cristopia	-33 °C to 27 °C
TEAP	-50 °C to 78 °C
Doerken	-22 °C to 28 °C
Mitsubishi Chemica	9.5 °C to 118 °C
Climator	-18 °C to 70 °C
EPS Ltd	-114 °C to 164 °C



Tab. 4.2: Tabulka výrobců

Pro nás nejdostupnější a nejvhodnější materiál vyrábí firma RubiTherm, která je schopna upravit materiál pro potřebnou teplotu tání. Tato firma řadí produkty do několika kategorií (RT, SP, PX, GR, PK), řada RT má největší tepelnou kapacitu, a proto je pro nás tato řada nejvhodnější.

Mezi vhodné produkty se řadí RT 58 s parametry: [23]

- teplota tání: 55 – 59 °C (typická 58 °C)
- tepelná kapacita (od 50 °C do 65 °C): 178 kJ/kg
- hustota (při 80°C): 0,77 g/cm<sup>3</sup>
- teplota vzplanutí: > 100 °C

anebo RT 82 s parametry:

- teplota tání: 77 – 82 °C (typická 82 °C)
- tepelná kapacita (od 75 °C do 90 °C): 176 kJ/kg
- hustota (při 80°C): 0,77 g/cm<sup>3</sup>
- teplota vzplanutí: 270°C

Zde je vidět, že teplota vzplanutí je celkem nízká, proto se parafín dá pouze považovat za referenční materiál.

Naopak mezi jeho velké výhody patří snadná manipulace a podle výzkumů Americké univerzity není vhodný pro smáčení kovu.

### 4.3 Výpočet entalpie

Při výpočtu entalpie vycházíme z dostupných dat, které uvádí Rubitherm [23].

#### RT58:

Vycházíme z hodnoty tepelné kapacity, která je rovna 178 kJ/kg v rozmezí 50 – 65 °C s hraniční teplotou 58 °C a měrné tepelné kapacity, která je uváděna jako 2 kJ/kg K. Neboť zjišťování vlastností materiálu je poměrně složité, spolupracuje se na tomto projektu s americkým partnerem, který provádí jeho přeměřování. Avšak pro základní představu o materiálu vycházíme z údajů, které uvádí výrobce.

Jestliže uvažujeme, že entalpie v 40 °C je rovna 0 kJ/kg a teplota fázové přeměny je v rozsahu 57-58 °C, pak má entalpie od 0 – 57 °C lineární průběh. Stejný průběh má i entalpie při teplotě vyšší než 58 °C.

Samotný výpočet pak vypadá následovně:

$$i(57\text{ }^{\circ}\text{C})_1 = (t_{57} - t_{40})c_p = (57 - 40)2 = 34\text{ kJ/kg} . \quad 4.3$$

Jelikož budeme potřebovat vypočítané entalpie k následnému zadání v programu Ansys, tak je musíme je převést na  $\text{GJ/m}^3$ :

$$i(57^\circ\text{C})_2 = i(57^\circ\text{C})_1 \rho_1 = 34 \cdot 880 = 29,92 \text{ GJ/m}^3, \quad 4.4$$

kde  $\rho$  značí hustotu tuhého parafínu ( $\rho_1 = 880 \text{ kg/m}^3$ ).

Dále vycházíme z předpokladu tepelné kapacity  $178 \text{ kJ/kg}$  ( $50 (t_{\min}) - 65 (t_{\max})^\circ\text{C}$ ). Dostáváme rozdíl entalpií mezi teplotami  $t_1 = 57^\circ\text{C}$  a  $t_2 = 58^\circ\text{C}$ :

$$\begin{aligned} \Delta i &= 178 - [(t_1 - t_{\min}) + (t_{\max} - t_2)]c_p \\ &= 178 - [(57 - 50) + (65 - 58)]2 = 150 \text{ kJ/kg}. \end{aligned} \quad 4.5$$

Pak je entalpie v teplotě  $58^\circ\text{C}$  rovna:

$$i(58^\circ\text{C})_1 = i(57^\circ\text{C})_1 + \Delta i = 34 + 150 = 184 \text{ kJ/kg}. \quad 4.6$$

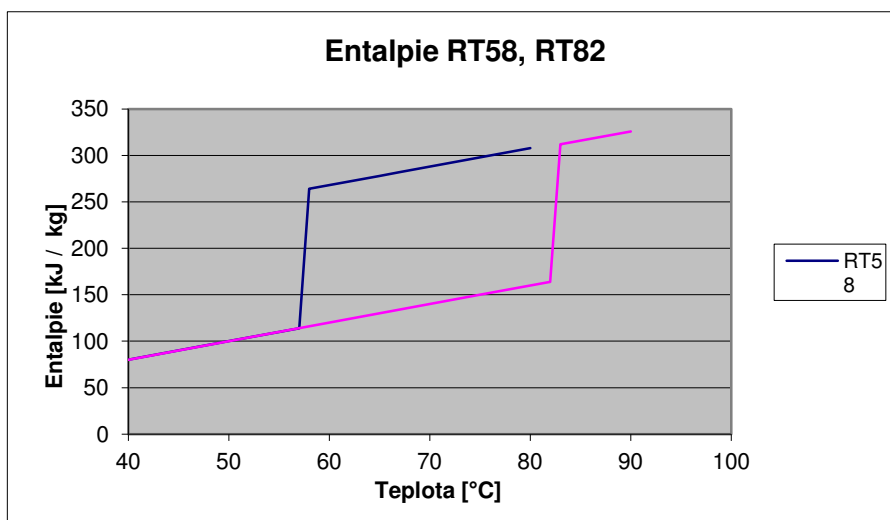
Pro přepočet entalpie na  $\text{GJ/m}^3$  vycházíme z rovnice (4.4), použijeme hustotu parafínu v kapalně fázi, abychom předešli poddimenzování chlazení bazénu (v pevné fázi je hustota větší). Jak už bylo zmíněno v úvodu, v této diplomové práci se budeme dále zabývat i možností aplikace materiálů s fázovou přeměnou v havarijním dochlazování bazénů s vyhořelým palivem.

$$\begin{aligned} i(58^\circ\text{C})_2 &= i(57^\circ\text{C})_1 + i(58^\circ\text{C})_1 \rho_2 \\ &= 29,92 + 184 \cdot 770 = 161,92 \text{ GJ/m}^3 \end{aligned} \quad 4.7$$

Pro výpočet entalpií v teplotách vyšších jak  $58^\circ\text{C}$ , pokračujeme podle rovnice (4.3), neboť se zde opět objevuje lineární závislost entalpie na teplotě.

$^\circ\text{C}$	$\text{kJ/kg}$	$\text{GJ/m}^3$
40	0	0
50	20	17,6
57	34	29,92
58	184	161,92
65	198	172,7
67	202	175,78
80	228	195,8

Tab. 4.3: Tabulka entalpií pro RT58



**Graf 4.1: Graf entalpií parafinů RT 58 a RT 82**

Tabulka výpočtů pro materiál RT82 je uvedena v příloze.

## 5 Konstrukce kondenzátoru

### 5.1 Volba materiálu trubek

Na rozdíl od ledového kondenzátoru, kde zkondenzovaná voda může být dále použita do sprchového systému, musí být v parařinovém kondenzátoru fyzické oddělení pomocí stěn výměníku tepla, který od sebe odděluje akumulátor tepla a kondenzující páru. V opačném případě by zkondenzovaná voda byla znehodnocena, neboť parařin není ve vodě rozpustitelný a mohlo by dojít k ucpání čerpadel nebo sprchového systému.

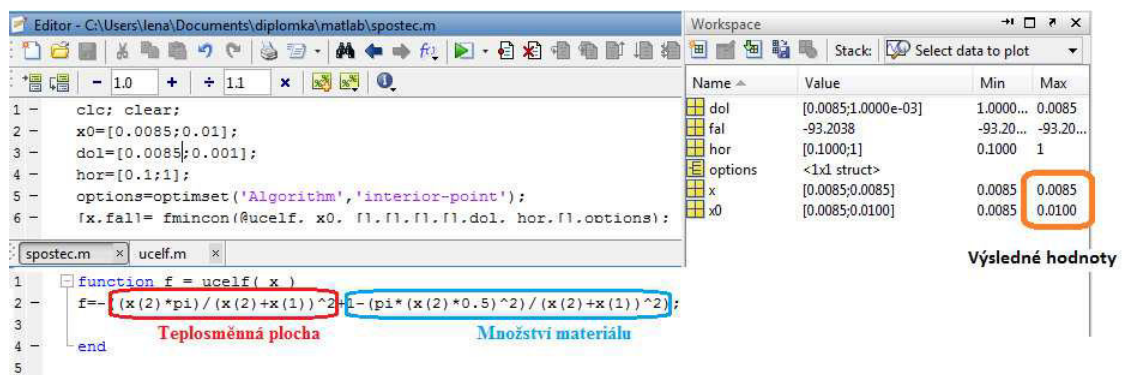
Materiál, který bude použit pro konstrukci kondenzátoru, musí vydržet vysoké teplo a mít dobrou tepelnou vodivost. Navíc nemůžeme použít materiály jako například železo, kobalt a chrom, které se příliš snadno „aktivují“ (Při ozáření materiálu neutrony vznikne indukované záření). Ty se následně nedají dekontaminovat přímo v primárním okruhu (vnitřní vestavby).

Proto zvolíme měděné potrubí, které má vysoký bod tání (1 083 °C) a tepelná vodivost se pohybuje kolem 339 W/m K.

### 5.2 Počet a geometrické uspořádání trubek

Rozměry trubek a jejich rozteče byly zjištěny pomocí optimalizace. To znamená, že jsme hledali průměr trubky a teplosměnnou plochu, která by byla co největší, aby se nám zvýšil celkový přenesený tepelný tok. Co největší rozteče mezi trubkami vedou k zvětšení objemu materiálu k akumulaci tepla.

Pomocí Matlabu a použití algoritmu vnitřního bodu<sup>2</sup> (viz Obr. 5.1) zjišťujeme optimální průměr  $d$  a rozteč  $s$ :



Obr. 5.1 Ukázka kódu v Matlabu

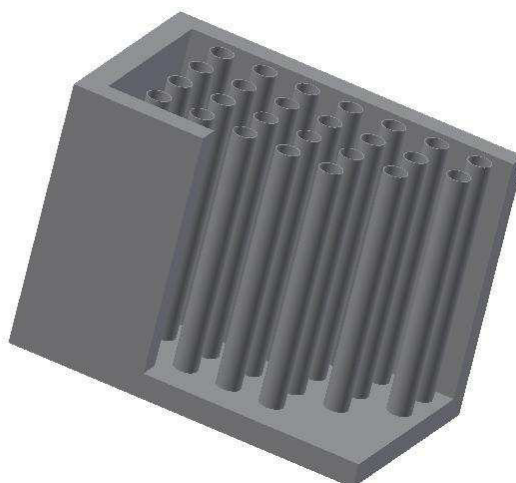
<sup>2</sup> Tento algoritmus se používá, jestliže se jedná o nelineární případ. Navíc toleruje nedefinované okrajové body pro všechny iterované body.

Odtud získáváme výsledek s ideálním průměrem  $d = 0,01$  m a rozteč  $s = 0,0085$  m. Pak dostáváme teplosměnnou plochu a množství použité látky pro kontrolní objem  $1 \times 1 \times 1$  m:

Rozteč trubek [m]	0,0085
Průměr trubky [m]	0,01
Počet trubek v řadě [-]	54
Počet trubek celkem [-]	2 916
Teplosměnná plocha [m <sup>2</sup> ]	91,61
Množství PCM [m <sup>3</sup> ]	0,77

Tab. 5.1 Výsledné hodnoty

Kvůli zjednodušení konstrukce a uchycení trubek je voleno uspořádání trubek za sebou viz Obr. 5.2.



Obr. 5.2 Model řazení trubek

## 6 Rozbor výpočtu parafínového kondenzátoru

### 6.1 Kondenzace

V této kapitole se budeme zabývat kondenzací par, které se uvolní při havárii LOCA.

Kondenzace vzniká, jestliže teplota páry klesne pod bod saturace. V technické praxi tento proces nastává obvykle při styku páry se studeným povrchem. Při kondenzaci je na teplosměnné ploše vytvářen kapalný kondenzát, který je potřeba odvádět. V našem případě se o tento odvod kapaliny postará gravitace. Jestliže je stěna smáčena kondenzátem a kondenzát odtéká v podobě souvislého kapalného filmu, pak tuto kondenzaci nazýváme filmovou. V případě, že stěna není souvislá vrstva filmu, pak se jedná o kapkovou kondenzaci (kondenzát stéká po stěně ve formě oddělených kapek).

Velkou otázkou se jeví, jestli je vhodnější horizontální nebo vertikální kondenzátor. Toto se dá zjistit pomocí vztahů, pomocí kterých lze vypočítat kondenzace v horizontálních (rce 6.1) a vertikálních trubkách (rce 6.2): [24]

$$Nu_{hor} = 0,729 \left[ \frac{gl_{23}(\rho_f - \rho_v)d^3}{\nu\lambda(t_{sat} - t_w)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad 6.1$$

$$Nu_{ver} = 1,03 \left[ \frac{gl_{23}(\rho_f - \rho_v)L^3}{\nu\lambda(t_{sat} - t_w)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad 6.2$$

Pak jde psát:

$$\frac{\alpha_{hor}}{\alpha_{ver}} = \frac{0,729}{1,03} \frac{L}{d} \frac{d^{\frac{3}{4}}}{L^{\frac{3}{4}}} = 0,645 \left( \frac{L}{d} \right)^{\frac{3}{4}} \quad 6.3$$

Jestliže vztah (6.3) použijeme pro náš případ: délka  $L=1,5$  m a průměr  $d = 0,01$  m pak dostáváme:

$$\alpha_{hor} = 0,645 \left( \frac{1}{0,01} \right)^{\frac{3}{4}} \alpha_{ver} = 2,04 \alpha_{ver} \quad 6.4$$

Odtud můžeme usoudit, že za stejných podmínek je koeficient přestupu tepla  $\alpha$  větší na horizontální trubce než na vertikální.

Horizontální kondenzátor se jeví jako vhodnější, ale vzhledem k tomu, že potřebujeme vzniklý kondenzát odvádět mimo kontejnment a omezenému rozměru, navíc i z důvodu jednodušší konstrukce je vhodnější zvolit vertikální kondenzátor.

Dříve než se dostaneme k samotnému výpočtu kondenzace, musíme zjistit, jak expanduje chladivo v primárním okruhu, jeho teplotu a tlak po gilotinovém přetržení trubek a jeho následný únik do prostoru kontejnmentu. Tímto problémem se budeme zabývat v následující kapitole.

## 6.2 Únik chladiva z primárního systému

Při úniku chladiva z primárního systému dojde ke zvýšení teploty a tlaku a to za konstantního objemu.

Budeme uvažovat, že nedojde ke spuštění havarijních systémů nebo akumulace tepla do stěn kontejnmentu.

Využijeme hodnoty uvedené v Příloze I. Jedná se o údaje, které byly naměřeny pro reaktor AP 1000 vytvořený stejnou firmou jako ledový kondenzátor a to firmou Westinghouse. Tabulka (Tab. 6.1) uvádí počáteční hodnoty, jaké jsou v kontejnmentu před LOCA havárií, parametry vody v primárním systému a také koncový stav, který vznikne na konci LOCA havárie:

	Chladivo primárního systému	Počáteční stav v kontejnmentu	Koncový stav v kontejnmentu
Tlak [MPa]	$p_p = 15,5$	$p_1 = 0,101325$	$p_t = 0,15$
Objem [m <sup>3</sup> ]	$V_p = 354$	$V_c = 58\,447$	$V_t = 58\,801$
Teplota [°C]	$t_p = 213,6$	$t_1 = 27$	$t_2 = \text{neznámá}$
Suchost (x <sub>st</sub> ) / relativní vlhkost (φ)	-	$\phi = 0,8$	hledáme

Tab. 6.1 Údaje pro AP 1000

Tlak i objem vody v primárním okruhu se liší podle projektu: [25]

Typ	VVER - 440	VVER – 1000
Objem [m <sup>3</sup> ]	209	337
Tlak [MPa]	12,25	15,7

Tab. 6.2 Srovnání tlaků a objemů v primárním okruhu pro jiné technologie

Výpočet provedeme podle postupu uvedeným v [26]. Počáteční stav v kontejnmentu, stejně tak i hodnoty pro primární systém jsou dány.

Tlak  $p_t$  je dán tlakem, při kterém se samovýklopné dveře u ledového kondenzátoru odklopí, aby do něj mohla proudit pára ( $p_t = 0,15$  MPa).

A objem  $V_t$  je dán součtem objemu vzduchu na počátku a objemu primárního okruhu:

$$V_t = V_p + V_c = 334 + 58\,447 = 58\,801 \text{ m}^3 \quad 6.5$$

V první fázi výpočtu budeme zjišťovat suchost páry při smíchání vlhkého vzduchu, který se nachází v kontejnmentu před protržením chladicího okruhu a páry, která vzniká při LOCA.

Ve druhé části budeme počítat suchost páry pomocí rovnováhy energií, které se uvolní při havárii.

Abychom docílili rovnosti suchostí, budeme postupně měnit teplotu  $t_2$ . Této teplotě nám bude odpovídat tlak, který také hledáme.

### 6.2.1 Výpočet teploty a tlaku

Nejdříve si určíme parciální tlak vypařené vody v ochranné obálce:

$$p_{w_1} = \phi \cdot p_{sat}(t_1) = 0,8 \cdot 3,56 \text{ kPa} = 2,85 \text{ kPa} \quad 6.6$$

Dále vypočítaný parciální tlak odečteme od tlaku atmosférického, abychom získali tlak vzduchu, který se zde nachází:

$$p_{a_1} = p_1 - p_{w_1} = 101,325 - 2,85 = 98,47 \text{ kPa} \quad 6.7$$

Následně pomocí X-steamu určíme měrný objem přehřáté páry při atmosférickém tlaku a teploty  $t_1 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$v_{w_1} = f(t_1, p_1) = 48,46 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Nyní již můžeme vypočítat hmotnost vody, která se nachází v kontejnmentu na počátku:

$$m_{w_1} = \frac{V_c}{v_{w_1}} = \frac{58\,447 \text{ m}^3}{48,46 \text{ m}^3/\text{kg}} = 1\,205 \text{ kg} \quad 6.8$$

Abychom byli schopni vypočítat hmotnost páry v primárním systému, musíme určit měrný objem vody primárního systému  $v_{wp}$ :

$$v_{wp} = f(p_p, t_p) = 0,00168 \text{ m}^3/\text{kg}. \quad 6.9$$

Dále hmotnost vody, která podle objemu a měrného objemu lze spočítat:

$$m_{wp} = \frac{V_p}{v_{wp}} = \frac{354 \text{ m}^3}{0,00168 \text{ m}^3/\text{kg}} = 210\,402,7 \text{ kg}. \quad 6.10$$

Poté je celková hmotnost chladiva primárního okruhu a vody před začátkem LOCA je:



$$m_w = m_{w_1} + m_{wp} = 1\,205 + 210\,402,7 = 211\,608,7 \text{ kg} \quad 6.11$$

Již známe všechny potřebné údaje pro výpočet suchosti páry v celém objemu  $V_t$  a teplotě  $t_2$  (už zvolené tak, aby se nám vypočítané suchosti rovnaly).

$$x_{st} = \frac{\frac{V_t}{m_w} - v_{f_2}}{v_{fg_2} - v_{f_2}} = \frac{\frac{58\,801}{211\,608,7} - 0,00108}{0,5364 - 0,00108} = 0,51 \quad 6.12$$

kde  $v_{f_2} = 0,00108 \text{ m}^3/\text{kg}$ , je měrný objem nesyčené kapaliny při teplotě  $t_2$  na konci LOCA.

$v_{fg_2} = 0,5364 \text{ m}^3/\text{kg}$ , je měrný objem páry při teplotě  $t_2$  na konci LOCA.

V druhé části výpočtu budeme počítat suchost páry pomocí energetické bilance. Jedná se o bilanci hmotností a rozdílů entalpií na začátku a na konci LOCA havárie. Tím pádem musíme zjistit entalpie páry:

- entalpie nasycené kapaliny při tlaku  $p_p$ :  $i_{wp_1} = 1629,85 \text{ kJ/kg}$ ,
- entalpie nasycené kapaliny při teplotě  $t_2$ :  $i_{f_2} = 580,61 \text{ kJ/kg}$ ,
- entalpie nasycené páry při teplotě  $t_2$ :  $i_{fg_2} = 2730,84 \text{ kJ/kg}$ ,
- entalpie nasycené kapaliny při teplotě  $t_2$  a tlaku  $p_{w_1}$ :  $i_{wa_1} = 2\,550,5 \text{ kJ/kg}$ .

Pak energetická bilance bude vypadat následovně:

$$m_{wp}(i_{f_2} + x_{st}i_{fg_2} - i_{wp_1}) + m_{wa}(i_{f_2} + x_{st}i_{fg_2} - i_{wa_1}) - m_a q_{va}(t_2 - t_{a_1}) = 0 \quad 6.13$$

Následně si z rovnice (6.13) vyjádříme neznámou suchost  $x_{st}$ :

$$\begin{aligned} x_{st} &= \frac{m_a q_{va}(t_2 - t_{a_1}) + m_{wp}(i_{wp_1} - i_{f_2}) + m_{wa}(i_{wa_1} - i_{f_2})}{i_{fg_2}(m_{wp} + m_{wa})} \\ &= \frac{66\,787,87 \cdot 10\,400 \cdot (138 - 27) + 210\,402,7 \cdot (2\,550,5 - 580,62)}{2\,730,84 \cdot (210\,402,7 + 1\,205,95)} \\ &\quad + \frac{1\,205,95 \cdot (2\,550,5 - 580,62)}{2\,730,84 \cdot (210\,402,7 + 1\,205,95)} = 0,51 \end{aligned} \quad 6.14$$

Výsledná teplota  $t_2 = 138 \text{ °C}$  a výsledný tlak, který odpovídá této teplotě je  $p_{w_2} = 341,5 \text{ kPa}$ .

Dále vypočítáme parciální tlak vzduchu na konci LOCA, k čemuž použijeme stavovou rovnici:

$$p_{a_2} = \frac{m_a R_a T_2}{V_t} = \frac{66\,787,87 \cdot 287,1 \cdot (138 + 273,15)}{58\,801} = 134,07 \text{ kPa} \quad 6.15$$

Po sečtení parciálního tlaku vzduchu  $p_{a_2}$  a tlaku vody  $p_{w_2}$  dostáváme celkový tlak na konci LOCA havárie:

$$p_2 = p_{w_2} + p_{a_2} = 341,5 + 134,07 = 475,58 \text{ kPa} \quad 6.16$$

Pak tedy výsledné hodnoty jsou:

	tlak $p_2$ [kPa]	teplota $t_2$ [°C]	suchost $x_{st}$ [-]
na konci LOCA	475,58	138	0,51

Tab. 6.3 Výsledné hodnoty

Konečný tlak v kontejnmentu nám vychází mnohem vyšší, než na který je projektován kontejnment s ledovým kondenzátorem, je to způsobeno tím, že jsme jako vstupní hodnoty použili parametry AP 1000 (pohybuje se kolem 0,5 MPa) [27].

Dále jsme uvažovali, že všechna voda z primárního okruhu se změní na páru, což by ve skutečnosti tomu tak nemuselo být.

Nyní po vypočítání potřebných hodnot můžeme přejít k samotnému výpočtu kondenzace. Budeme předpokládat filmovou kondenzaci i přes to, že by kapičková byla příhodnější. Filmová kondenzace způsobuje horší přestup tepla, a proto budeme uvažovat tento případ, aby nedošlo k poddimenzování kondenzátoru.

## 6.3 Filmová kondenzace

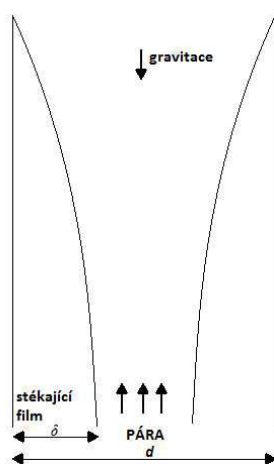
Jak bylo zmíněno již v podkapitole (6.1), jestliže se nasycená pára dostane do styku s chladným povrchem, bude následně přecházet do kapalného skupenství, neboli kondenzovat.

Kondenzaci nazveme filmovou, jestliže se stěna smáčí kondenzátem a kondenzát odtéká ve formě souvislého filmu. Přestup tepla, o který se budeme zajímat, závisí na tloušťce filmu a druhu proudění (laminární, turbulentní). Tloušťka filmu se od shora dolů postupně zvětšuje a tím se mění i hodnota součinitele přestupu tepla, která klesá.

Budeme řešit dva případy kondenzace, a to jestli pára dojde mít souhlasný směr, nebo protikladný směr jako stékající film.

### 6.3.1 Protiproud

Nyní vypočítáme protiproudý případ, kdy pára vstupuje do kondenzátoru ze spodu a zkondenzovaný film stéká vlivem gravitace dolů do připravených nádrží (viz Obr. 6.1). Z těchto tanků se dá dále zkondenzovaná voda čerpat do sprchového systému, umístěného v horní části kontejnmentu (to může být samozřejmě použito i u souprroudého kondenzátoru).



Obr. 6.1 Protiproudá kondenzace

Pro výpočet tohoto případu použijeme vztah pro výpočet Nusseltova čísla z [28], který využívá střední teploty k výpočtu tepelné vodivosti  $\lambda$  a dynamické viskozity  $\mu$ . Tento vztah předpokládá, že povrch je izotemický a přestup tepla je realizován pouze vedením:

$$Nu = \left( \frac{\rho_f(\rho_f - \rho_g)g i_{fg} L^3}{4\mu_f \lambda_f (t_{stř} - t_w)} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad 6.17$$

kde  $\rho_f$  značí hustotu kondenzátu vzniklého na stěnách trubek. Hustotu vypočítáme pomocí X-steamu, kde je hledaná hustota závislá na tlaku, pak  $\rho_f = 970,21 \text{ kg/m}^3$ .

$\rho_g$  označuje hustotu páry ( $\rho_g = 0,969 \text{ kg/m}^3$ ),

$i_{fg}$  značí latentní teplo, které se vypočítá jako rozdíl entalpií plynné  $i_v$  a kapalné fáze  $i_f$ :

$$i_{fg} = i_v - i_f = 2698,8 - 483,18 = 2215,62 \text{ kJ/kg}, \quad 6.18$$

$L$  označuje výšku kondenzátoru ( $L = 1,5 \text{ m}$ ),

$\mu_f$  vyjadřuje dynamickou viskozitu ( $\mu = 3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ),

$\lambda_f$  je tepelná vodivost ( $\lambda = 0,668 \text{ W/m K}$ ),

$t_{stř}$  značí střední teplotu, která se vypočítá jako:

$$t_{stř} = \frac{t_w + t_{sat}}{2} = \frac{50 + 115,15}{2} = 82,57 \text{ °C}, \quad 6.19$$

kde  $t_w$  je teplota stěny ( $t_w = 50\text{ °C}$ ) a  $t_{\text{sat}}$  označuje teplotu saturace ( $t_{\text{sat}} = 115,15\text{ °C}$ ).

Pak Nusseltovo číslo podle vztahu (6.17) je rovno:

$$Nu = \left( \frac{\rho_l(\rho_l - \rho_g)g i_{fg} L^3}{4\mu_l \lambda (t_{\text{stř}} - t_w)} \right)^{\frac{1}{4}} \quad 6.20$$
$$= \left( \frac{970,21(970,21 - 0,969)9,81 \cdot 2\,215,62 \cdot 1,5^3}{4 \cdot 3 \cdot 10^{-4} \cdot 0,668(82,57 - 50)} \right)^{\frac{1}{4}} = 1\,232,37$$

Odtud pak z Nusseltova čísla dopočítáme koeficient přestupu tepla  $\alpha$ , které je dáno vztahem:

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{L} = \frac{1\,232,37 \cdot 3 \cdot 10^{-4}}{1,5} = 549,3\text{ W/m}^2\text{ K}. \quad 6.21$$

Pro srovnání vypočítáme Nusseltovo číslo  $Nu$  pro kondenzující kapalný film uvnitř trubky pomocí vztahu z [29], který uvažuje, že tlak je konstantní, stejně tak i teplota stěny  $t_w$  mezi filmem a chladivem:

$$Nu_f = c Re_f^n Pr^{\frac{1}{3}} \quad 6.22$$

kde koeficienty  $c$  a  $n$  jsou dány Reynoldsovým číslem a jsou rovny  $c = 1,86$  a  $n = \frac{1}{3}$ .

Reynoldsovo číslo se vypočítá pomocí následující rovnice:

$$Re_f = \frac{v L}{\nu} = \frac{51,07 \cdot 1,5}{2,56 \cdot 10^{-7}} = 0,3 \cdot 10^9 \quad 6.23$$

kde  $L$  je délka trubky ( $L = 1,5\text{ m}$ )

$\nu$  je kinematická viskozita ( $\nu = 5,56 \cdot 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$ )

$v$  je rychlost padajícího filmu, která se vypočítá následovně.

$$v = \frac{1}{3} \frac{\rho g \delta^2}{\mu} = \frac{1}{3} \frac{946 \cdot 9,81 \cdot 0,001^2}{0,028035} = 51,07\text{ m/s} \quad 6.24$$

kde  $\rho$  je hustota ( $\rho = 890\text{ kg/m}^3$ )

$g$  značí gravitační zrychlení ( $g = 9,81\text{ m/s}^2$ )

$\delta$  označuje tloušťku filmu (pro tento výpočet máme  $\delta = 0,01\text{ m}$ , další

výpočty s různými tloušťkami jsou přidány v příloze na CD)

a dynamickou viskozitu  $\mu_f$  vypočítáme jako:

$$\mu_f = f(p, i_f) = 0,000242\text{ Pa/s}$$

Pro výpočet Nusseltova čísla potřebujeme vypočítat už jen Prandtlovo číslo:

$$Pr = f(p; t_{stř}) = 2,15 \quad 6.25$$

Pak po dosazení do rovnice (6.22), dostáváme:

$$Nu_f = c Re_f^n Pr^{\frac{1}{3}} = 1,86 \cdot (0,3 \cdot 10^9)^{\frac{1}{3}} \cdot 2,15^{\frac{1}{3}} = 1\,606,66 \quad 6.26$$

Dále již můžeme vypočítat i koeficient přestupu tepla a to následovně:

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{L} = \frac{1\,606 \cdot 0,683}{1,5} = 731,17 \text{ W/m}^2\text{K} \quad 6.27$$

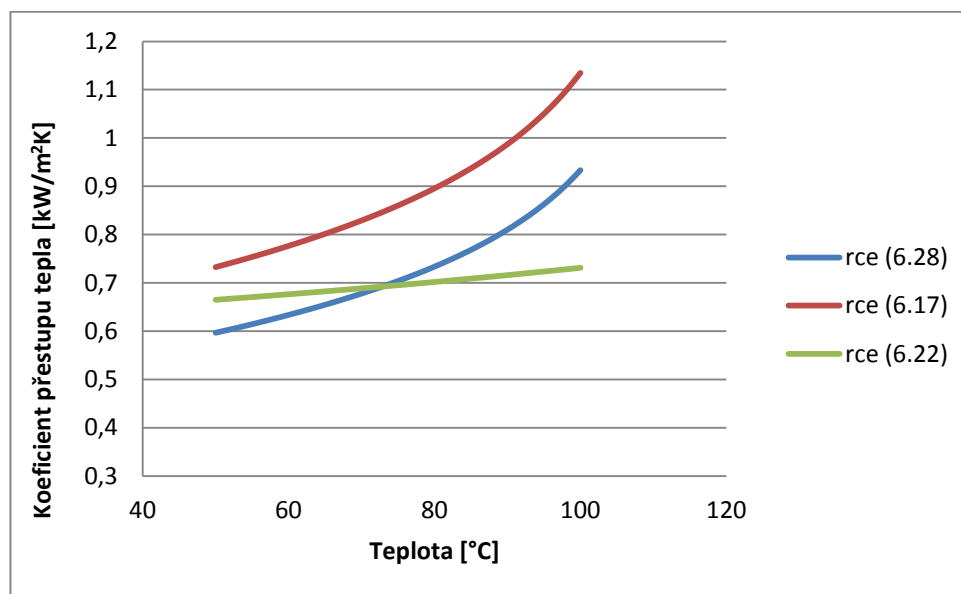
Dále použijeme vztah pro výpočet přestupu tepla  $\alpha$  podle Beatty – Katz z [28], který počítá se střední teplotou  $t_{stř}$  k výpočtu dynamické viskozity  $\mu$  a tepelné vodivosti  $\lambda$ , navíc neuvažuje povrchové napětí filmu:

$$\alpha = 0,943 \left( \frac{\rho_l(\rho_l - \rho_g)g\lambda^3 i_{fg}}{\mu L(t_{stř} - t_w)} \right)^{\frac{1}{4}} \quad 6.28$$

Po dosazení všech hodnot dostáváme koeficient přestupu tepla  $\alpha$  roven:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,943 \left( \frac{\rho_l(\rho_l - \rho_g)g\lambda^3 i_{fg}}{\mu L(t_{stř} - t_w)} \right)^{\frac{1}{4}} = \\ &= 0,943 \left( \frac{970,21(970,21 - 0,969)9,81 \cdot 0,668^3 \cdot 2\,215,62}{0,34 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5(82,57 - 50)} \right)^{\frac{1}{4}} \quad 6.29 \\ &= 732,6 \text{ W/m}^2\text{K}. \end{aligned}$$

Srovnání jednotlivých výsledků, pro které platí různé podmínky, jsou znázorněny v následujícím v grafu 4.1:

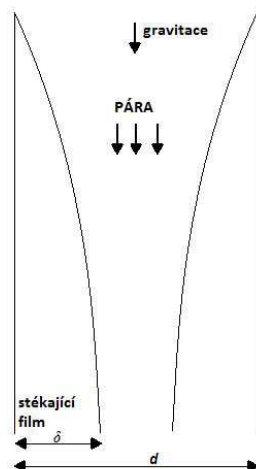


Graf 6.1 Srovnání koeficientů přestupu tepla u protiproudu

Pro srovnání budeme za stejných podmínek počítat souproudé proudění páry a padajícího filmu.

### 6.3.2 Souproud

Pro srovnání je vhodné ještě přepočítat i souproudé proudění, kde pára má souhlasný směr jako stékající kondenzát (viz Obr. 6.2).



Obr. 6.2 Souproudá kondenzace

Pro výpočet Nusseltova čísla využijeme vzorec uvedený v[30], kde je brána teplota saturace pro výpočet tepelné vodivosti  $\lambda$ , měrné tepelné kapacity  $c_p$  atd...

$$Nu = 0,943 \left( \frac{Gr Pr}{Ja} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad 6.30$$

kde Gr je Grashofovo číslo a je dáno rovnicí:

$$Gr = g \frac{L^3 (\rho_l - \rho_g)}{\nu^2 \rho_l}, \quad 6.31$$

kde g značí gravitační zrychlení ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ )

L označuje výšku kondenzátoru ( $L = 1,5 \text{ m}$ )

$\nu$  je kinematická viskozita, kterou vypočítáme

$$\nu = \frac{\eta}{\rho_l} = \frac{2,4 \cdot 10^{-4}}{946,96} = 2,56 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \quad 6.32$$

$\eta$  označuje dynamickou viskozitu, kterou vypočítáme pomocí X-steamu

$$\eta = f(p; i_l) = f(1,7; 483,18) = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s} \quad 6.33$$

$\rho_l$  je označována hustota kapalné fáze ( $\rho_l = 946,96 \text{ kg/m}^3$ )

$\rho_g$  značí hustotu plynné fáze ( $\rho_g = 0,969 \text{ kg/m}^3$ ).

Pak po dosazení do rovnice (6.31) dostáváme Grashofovo číslo:

$$Gr = g \frac{L^3 (\rho_l - \rho_g)}{\nu^2 \rho_l} = 9,81 \frac{1,5^3}{2,56 \cdot 10^{-7}} \frac{(946,96 - 0,969)}{946,96} = 5,04 \cdot 10^{14} \quad 6.34$$

Pr je Prandtlovo číslo, které je závislé na tlaku p a entalpii  $i_l$ , vypočítáme pomocí X-steamu:

$$Pr = f(p; i_l) = f(1,7; 483,18) = 1,51. \quad 6.35$$

Ja označuje Jakobovo číslo a je dáno

$$Ja = \frac{c_{pl}(t_{sat} - t_w)}{i_{fg}}, \quad 6.36$$

$c_{pl}$  značí měrnou tepelnou kapacitu kapalné fáze, která je opět vypočítána pomocí X-steamu ( $c_{pl} = 4,23 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ ),

$t_{sat}$  označuje teplotu saturace ( $t_{sat} = 115,15 \text{ } ^\circ\text{C}$ ),

$t_w$  je teplota stěny ( $t_w = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$ ),

$i_{fg}$  značí latentní teplo, které se vypočítá, jako rozdíl entalpií plynné  $i_v$  a kapalné fáze  $i_l$ :

$$i_{fg} = i_v - i_l = 2698,8 - 483,18 = 2215,62 \text{ kJ/kg}. \quad 6.37$$

Následně po dosazení do rovnice (6.36) dostáváme:

$$Ja = \frac{c_{pl}(t_{sat} - t_w)}{i_{fg}} = \frac{4,23(115,15 - 50)}{2215,62} = 0,125 \quad 6.38$$

Pak po dosazení vypočítaných hodnot do rovnice (6.30) získáváme hodnotu Nusseltova čísla:

$$Nu = 0,943 \left( \frac{Gr Pr}{Ja} \right)^{\frac{1}{4}} = 0,943 \left( \frac{5,04 \cdot 10^{14} \cdot 1,5}{0,125} \right)^{\frac{1}{4}} = 8331,27 \quad 6.39$$

Následně pak koeficient přestupu tepla lze vypočítat:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{L} = \frac{8331,27 \cdot 0,6826}{1,5} = 3791,42 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad 6.40$$

kde  $\lambda$  označuje tepelnou vodivost a lze ji opět vypočítat pomocí X-steamu ( $\lambda = 0,68 \text{ W/m K}$ ).

Neboť každý zdroj uvádí jiný postup řešení, tak ještě pro srovnání provedeme výpočet Nusseltova čísla, které je uvedeno v [31]:

$$Nu = 1,03 \left( \frac{Gr Pr}{Ja} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad 6.41$$

tato rovnice počítá se zvlněným povrchem, který má blána kondenzátu při stékání. Proto je použitý koeficient vyšší než u předešlé použité rovnice (6.30). Dále uvažuje střední teplotu k výpočtu kinematické viskozity  $\nu$  a měrné tepelné kapacity  $c_p$  atd. Střední teplota je dána rovnicí (6.19).

Pak Grashofovo číslo se vypočítá podle rovnice (6.31):

$$Gr = g \frac{l^3 (\rho_l - \rho_g)}{\nu^2 \rho_l} = 9,81 \frac{1,5^3}{3,53 \cdot 10^{-7}} \frac{(970,21 - 0,969)}{970,21} = 2,64 \cdot 10^{14}, \quad 6.42$$

kde se kinetická viskozita  $\nu$  se vypočítá pomocí X-steamu:

$$\nu = \frac{f(p; t_{stř})}{\rho_l} = \frac{f(1,7; 82,57)}{970,21} = 3,53 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}, \quad 6.43$$

hustoty kapalné  $\rho_l$  a i plynné fáze  $\rho_g$  se vypočítají opět pomocí X-steamu a jsou funkcí střední teploty  $t_{stř}$ .

Prandtlovo číslo  $Pr$  je vypočítáno znova pomocí X-steamu:

$$Pr = f(p; t_{stř}) = f(1,7; 82,57) = 2,15. \quad 6.44$$

Jakobovo číslo je vypočítáno podle rovnice (6.36)



$$Ja = \frac{c_{pl}(t_{sat} - t_w)}{i_{fg}} = \frac{4,19(115,15 - 50)}{2215,62} = 0,123. \quad 6.45$$

Pak po dosazení do rovnice (6.41) dostáváme Nusseltovo číslo

$$Nu = 1,03 \left( \frac{Gr Pr}{Ja} \right)^{\frac{1}{4}} = 1,03 \left( \frac{2,64 \cdot 10^{14} \cdot 2,15}{0,123} \right)^{\frac{1}{4}} = 8488,36. \quad 6.46$$

Následně po dosazení do rovnice (6.40) získáváme koeficient přestupu tepla

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{L} = \frac{8488,36 \cdot 0,6886}{1,5} = 3\,783,78 \text{ W/m}^2\text{K}. \quad 6.47$$

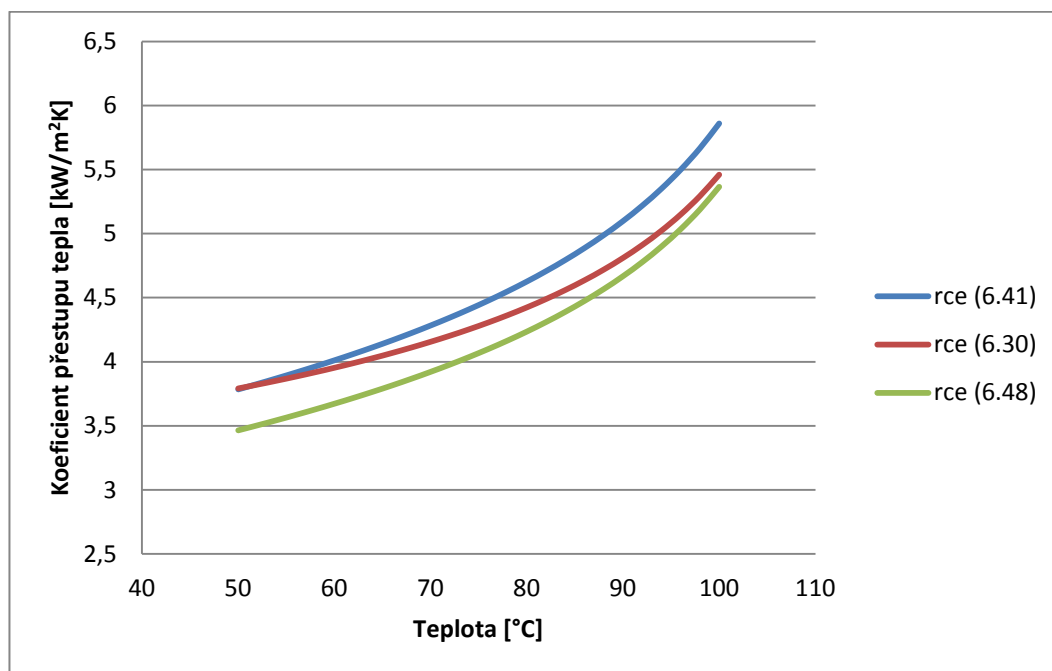
Poslední rovnice pro srovnání Nusseltova čísla počítá opět se střední teplotou  $t_{stř}$ , jen zde není uvažováno vlnění blány kondenzátu, proto je užitý koeficient nižší než u rovnice (6.41).

$$Nu = 0,9428 \left( \frac{Gr Pr}{Ja} \right)^{\frac{1}{4}} = 0,9428 \left( \frac{2,64 \cdot 10^{14} \cdot 2,15}{0,123} \right)^{\frac{1}{4}} = 7\,769,74. \quad 6.48$$

Pak koeficient přestupu tepla  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{L} = \frac{7\,769,74 \cdot 0,6886}{1,5} = 3\,463,45 \text{ W/m}^2\text{K}. \quad 6.49$$

Následující Graf 6.2 znázorňuje průběh koeficientů přestupu tepla, vypočítané jednotlivými rovnicemi:



Graf 6.2 Porovnání koeficientů tepla

Přestup tepla závisí na tloušťce filmu a na druhu proudění, tzn. jestli se jedná o laminární či turbulentní. A také jestli se povrch kondenzátu zvlíní vlivem Reynoldsova čísla filmu  $Re_f$  a smykového napětí na povrchu filmu. Jestliže se povrch hodně zvlíní (s tímto počítá rovnice 6.48) nebo Reynoldsovo číslo bude turbulentní, pak i přestup tepla  $\alpha$  bude větší.

	Protiproud	Souproud
$\alpha$ [kW/m <sup>2</sup> K]	0,549	3,791
	0,731	3,793
	0,732	3,463

Tab. 6.4 Srovnání souproudé a protiproudé kondenzace

Z tabulky (Tab. 6.4) je zřejmé, že koeficient přestupu tepla u protiproudé kondenzace vychází řádově nižší než u souproudé. Toto může být způsobeno tím, že při proudění páry směrem vzhůru je stékání filmu zpomalováno a tím pádem bude mít i větší tloušťku (Jestliže nám kondenzuje stejné množství a rychlost stékání je nižší, pak tloušťka filmu je větší).

## 6.4 Výpočet množství zkondenzované páry

Budeme uvažovat kondenzátor, který je umístěn kolem kontejnmentu, o výšce 16 m a tloušťce 2 m.

Nejdříve vypočítáme obsah výseče kruhového prstence, který svírá vnitřní úhel  $\alpha = 270^\circ$ , vnější průměr  $r_1 = 17,2$  m (DC. Cook) a vnitřní průměr  $r_2 = 15,2$  m.

$$S = \frac{\pi r_1^2 \alpha}{360} - \frac{\pi r_2^2 \alpha}{360} = \frac{\pi \cdot 17,2^2 \cdot 270}{360} - \frac{\pi \cdot 15,2^2 \cdot 270}{360} = 153 \text{ m}^2 \quad 6.50$$

Z předchozích výpočtů víme, že do 1 m<sup>2</sup> se vleze zhruba 2 916 (Tab. 5.1). Pak přibližný celkový počet trubek v kondenzátoru bude roven:

$$n_{celk} = S \cdot n_1 = 153 \cdot 2\,916 = 446\,148 \quad 6.51$$

Následný výpočet množství zkondenzované páry bude následující:

$$\dot{m} = \frac{q}{i_{fg}} = \frac{\alpha S_{tr}(t_{sat} - t_w)}{i_{fg}} = \frac{\alpha \pi d L (t_{sat} - t_w)}{i_{fg}} \quad 6.52$$

### 1. Protiproud

Pro výpočet množství zkondenzované páry použijeme vypočítaný koeficient přestupu tepla pro teplotu 50 °C ze vztahu (6.21). Pak po dosazení do rovnice (6.52) dostáváme:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \frac{\alpha \pi d L (t_{sat} - t_w)}{i_{fg}} = \frac{0,549 \cdot \pi \cdot 0,01 \cdot 16 (115,15 - 50)}{2\,215,62} = \\ &= 3\,622,45 \text{ kg/s} \end{aligned} \quad 6.53$$

Jestliže budeme předpokládat, podobně jako u výpočtu konečné teploty a tlaku (kap. 6.2.1), že veškeré chladivo se změní na páru. Pak by trvalo zkondenzování veškeré páry:

$$\tau = \frac{m_w}{\dot{m}} = \frac{211\,608}{3\,622,45} = 58,42 \text{ s} \quad 6.54$$

Obdobný výpočet pro srovnání bude proveden i u souproutého kondenzátoru.

### 2. Souprout

Obdobným způsobem vypočítáme množství zkondenzované páry v případě využití souproutého kondenzátoru. V tomto případě využijeme koeficientu přestupu tepla ze vztahu (6.48):

$$\dot{m} = \frac{\alpha \pi d L (t_{sat} - t_w)}{i_{fg}} = \frac{3,46 \cdot \pi \cdot 0,01 \cdot 16 (115,15 - 50)}{2\,215,62} = 6.55$$
$$= 22\,838 \text{ kg/s}$$

V tomto případě by došlo ke zkondenzování veškeré páry v podstatě kratší době:

$$\tau = \frac{m_w}{\dot{m}} = \frac{211\,608}{22\,838} = 9,2 \text{ s} \quad 6.56$$

Ve skutečnosti by ke zkondenzování veškeré páry nastalo dříve, neboť jakmile by tlak v kontejnmentu dosáhl 0,17 MPa dveře by se otevřely a pára by začala proudit do kondenzátoru.

V následujících kapitolách se budeme zabývat problematikou skladování vyhořelého paliva v bazénech. Hlavně se zaměříme na chlazení BSVP.

## **7 Skladování vyhořelého jaderného paliva**

V současné době známe dva způsoby jak VJP skladovat, tyto způsoby rozdělujeme podle principu chlazení na mokrý a suchý způsob [32].

### **1. Mokrý způsob (chladičem je voda)**

Tento způsob skladování je v současné době nejrozšířenější, je využíván například v Jaslovských Bohunicích.

Mokrý způsob skladování je velmi bezpečný, vzhledem k dobrému odvodu tepla a stínění nebezpečného záření. Vzniklé teplo je odváděno chladicími okruhy do výměníku.

Jednou z největších výhod tohoto skladování, kromě dobrého odvodu tepla, je i snadná vizuální kontrola použitého paliva.

Velkou nevýhodou mokrých skladů je velká energetická náročnost (velké provozní náklady), velké nároky na udržení kvality demineralizované vody a vznik dalších radioaktivních odpadů (chladicí médium).

### **2. Suchý způsob (chladičem je vzduch)**

Tento způsob skladování se hlavně používá při delších intervalech skladování (je používán i v JE Dukovany, či JE Temelín).

U suchého způsobu skladování VJP jsou palivové soubory uloženy do speciálních kontejnerů a následně umístěny ve speciálních budovách či na volném prostranství. Teplo VJP je odváděno přirozenou cirkulací vzduchu a speciální kontejnery zamezují úniku radioaktivních látek.

Velkou výhodou suchého skladování oproti mokrému jsou nižší provozní náklady. Dále toto skladování umožňuje snazší manipulaci s kontejnery či rozšíření skladovacího prostoru.

Naopak mezi nevýhody patří horší odvod tepla vůči mokrému skladování a špatná možnost vizuální kontroly.

Dříve než je VJP umístěno do meziskladů, musí se po vytažení z AZ přemístit do chladicího bazénu. Pokud by se vyhořelé palivo vložilo ihned do kontejneru, mohlo by dojít k uvolnění velkého tepla, poškození kontejneru a následnému úniku radioaktivních látek do ŽP.

## 8 Bazén s vyhořelým palivem

Na konci každého cyklu se použité palivo vyjme z reaktoru a je přemístěno zavážecím strojem pod hladinu vody do bazénu použitého paliva, který se může nacházet v reaktorovém sále hned vedle reaktoru. Zde jsou palivové články uloženy několik (min 5 let) let, dokud radioaktivita neklesne asi na 50 % původní hodnoty.

Bazény skladování vyhořelého paliva zajišťují následující funkce:

- odvod zbytkového tepla PS
- zajištění integrity pokrytí paliva (ochrana pokrytí před tepelným, chemickým a mechanickým poškozením)
- udržení podkritičnosti skladovaného vyhořelého paliva
- ochranu okolního prostředí před radioaktivním zářením
- zabránění úniku radioizotopů do okolního prostředí

Tyto požadavky musí být splněny po celou dobu životnosti zařízení ve všech situacích, ať už standardních či nestandardních.

Po určité době je v reaktoru vyměněna čtvrtina až třetina celkového objemu paliva. Výrazný pokles teploty vyhořelého paliva nastává mezi dvěma a čtyřmi roky, méně již čtyřmi a šesti roky. Palivo musí být neustále chlazeno. Cirkulaci vody zajišťují čerpadla, které vhání vodu do výměníků, kde se ochladí a následně vypouští zpátky do bazénu (viz následující kapitola). Teplota vody se v normálních provozních podmínkách se pohybuje teoreticky kolem 50 °C. Při výměně paliva může tato teplota stoupnout až na 60 °C. Což je způsobeno tím, že při výměně paliva se nejdříve musí vyvézt celá aktivní zóna [33].

Jakmile radioaktivita klesne na přijatelnou úroveň, tak se použité soubory vloží do speciálních kontejnerů a odvezou do meziskladu vyhořelého jaderného paliva (suché, mokré, viz předchozí kapitola), kde se skladují řádově několik desítek let, dokud se nesníží zbytkový tepelný výkon použitého paliva na hodnotu potřebnou pro jeho případné další přepracování nebo uložení do hlubinného úložiště jaderného odpadu.

Pokud by selhal výměník, teplota vody v bazénu by se zvýšila tak, až by začala po určité době vařit. Pokud by var přetrval, klesla by hladina vody pod horní část vyhořelého paliva a zároveň by se začaly obnažovat palivové soubory. Vzduch nad hladinou nezvládne odvádět zbytkové teplo z tyčí, takže soubory se začnou zahřívat. Po určité době by začalo zirkoniové pokrytí reagovat s párou a vzduchem a začal by se uvolňovat vodík, který by se mohl při určité koncentraci vznítit. Proto se musí kontrolovat i stav vzduchu a je třeba jej pravidelně čistit i během provozu.

## 8.1 Rozdělení BSVP

Kromě hlavní funkce skladování vyhořelého paliva plní bazén i další funkce, které jsou spojeny s jeho umístěním v reaktorovém bloku. Ve světě se používá dvojí umístění bazénů a to vně a mimo kontejnment.

### 8.1.1 BSVP vně kontejnmentu

Bazén je umístěn mimo kontejnment a to v budově, která je přistavěna u kontejnmentu. Na tuto budovu jsou kladeny stejné seizmické nároky jako na kontejnment (odolnost vůči pádu letadla...).

Toto umístění bazénu je hlavně z důvodu nedostatku místa v kontejnmentu (hlavně díky vertikálnímu umístění parogenerátorů a tedy snižování vnitřního objemu kontejnmentu).

K výměně paliva je v kontejnmentu umístěn malý servisní bazén, ze kterého je vyhořelé palivo přesouváno speciálním manipulačním zařízením. Toto zařízení pracuje plně automaticky a lze jej používat i během provozu.

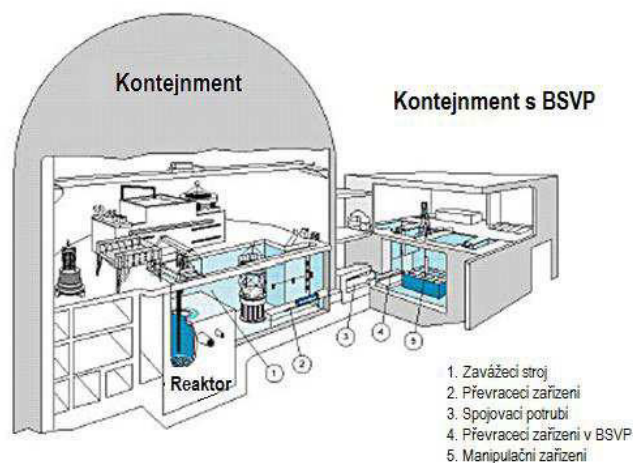
#### Výhody:

- Kratší doba odstávek - vyhořelé palivo se dá přesunout do BSVP i při provozu
- Větší kapacita BSVP

#### Nevýhody:

- Nutná stavba druhé, hermeticky odolné, budovy
- Stavba servisního bazénu
- Stavba manipulačního zařízení
- Průchody mezi oběma budovami zvyšují riziko radiačního úniku
- Více manipulací s vyhořelým palivem

I přes vyšší počet nevýhod se ve světě více používají BSVP vně kontejnmentu, a to hlavně díky větší kapacitě BSVP.



Obr. 8.1 BSVP mimo ochranou obálku[34]

### 8.1.2 BSVP uvnitř kontejnmentu

Bazén se nachází v bezprostřední blízkosti reaktoru, což zjednodušuje výměnu paliva. Kromě vyhořelého paliva se zde může skladovat i čerstvé palivo, dále i potřebné nástroje pro výměnu nebo údržbu reaktoru.

#### Výhody:

- Zjednodušení překládání paliva
- Veškeré operace probíhají v kontejnmentu
- Stačí jeden společný havarijní systém
- Sice dražší stavba většího kontejnmentu, ale hlavně větší bezpečnost v případě LOCA havárie

#### Nevýhody:

- Prodloužení odstávky – výměna paliva je možná pouze mimo provoz
  - V případě ohrožení reaktoru je ohrožen i BSVP
  - Menší kapacita bazénu než v případě umístění mimo kontejnment
- [35]





Obr. 8.2 BSVP uvnitř kontejnmentu[36]

## 8.2 Bezpečnostní prvky bazénů s vyhořelým palivem

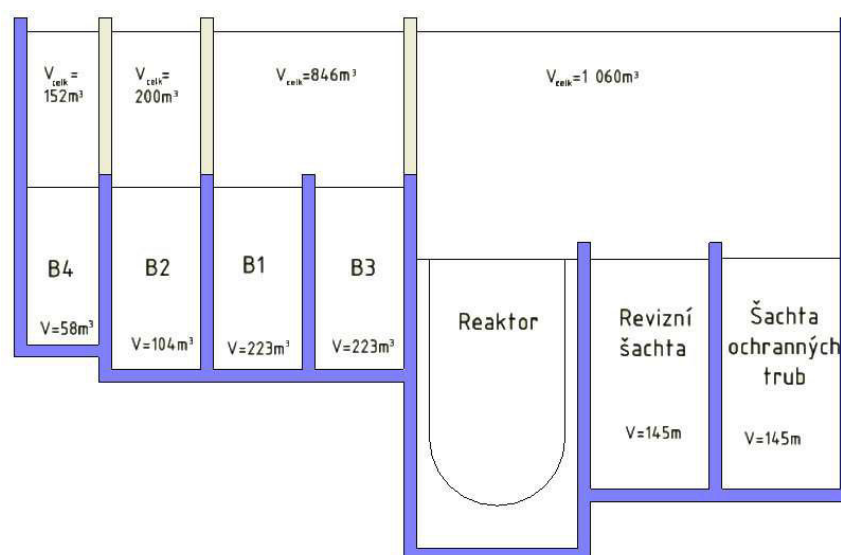
K provozu BSVP se vztahuje provozní předpis 1(2)T045 „Systém chlazení bazénu skladování VP“. Pro provoz BSVP platí také limity a podmínky bezpečného provozu uvedené v předpise TL001 (kap. A.3.9), které ve vztahu k BSVP stanovují požadavky na:

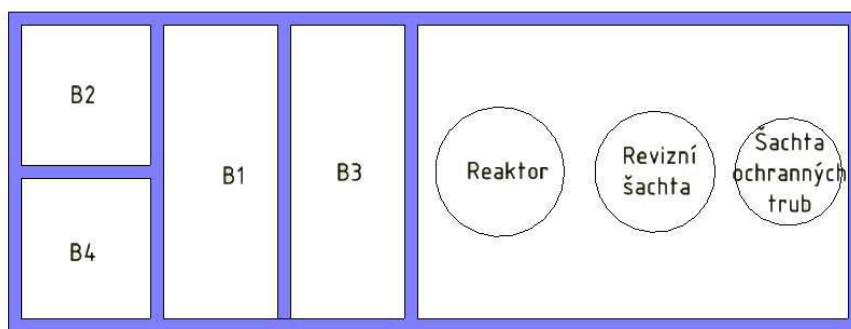
- hladinu, teplotu a koncentraci  $\text{H}_3\text{BO}_3$  v bazénu skladování,
- provozuschopnost chladicích okruhů systému chlazení bazénu skladování,
- opatření proti vniku čistého kondenzátu [37].

### 8.2.1 Systém bazénů

Systém BSVP (v JE Temelín) se skládá ze šesti šachet (viz Obr. 8.3):

- Šachty B1, B3, které slouží ke skladování a dochlazování vyhořelého paliva.
- Šachta B2 je využívána pouze pro havarijní vyvezení AZ, jinak je udržována prázdná.
- V šachtě B4 (Šachta transportního kontejnmentu) je umístěno hnízdo pro transportní kontejnery (pro vyhořelé a čerstvé palivo).
- Revizní šachta, která se užívá k revizi a uložení částí reaktoru.
- Šachta ochranných trub je využívána k uložení trub reaktoru při výměně paliva.





Obr. 8.3 Řez a půdorys BSVP

Stěny a dno bazénu jsou tvořeny betonem a dvěma plechovými stěnami (ze strany betonu a bazénu) každá o tloušťce 8 mm.

Při normálním provozu jsou bazény překryty ocelovými deskami o tloušťce 30 mm a je v činnosti pouze jedno čerpadlo. Jestliže by se teplota v bazénu zvýšila nad 50 °C, muselo by se zapnout ještě jedno čerpadlo.

Samotné bazény skladování VJ jsou odděleny od betonové šachty reaktoru hermetickým uzávěrem, tzv. stavědlem. Stavědlo je jednostranně vodotěsné a skládá se z hradítka a základového rámu.

[38]

### 8.2.2 Chlazení BSVP

Systém je složen z permanentně instalovaných primárních smyček (viz níže v této kapitole), které jsou umístěny uvnitř reaktorové budovy a mobilní sekundární smyčky. Sekundární chladicí smyčka je vedena mimo areál elektrárny a dále pak vně reaktorovny. Sekundární smyčka se využívá pro havarijní nebo předem plánované účely.

Havarijní systém chlazení je tvořen mobilními dieselovými generátory, rozvodnou, vzduchovými kompresory a dalšími pomocnými zařízeními.

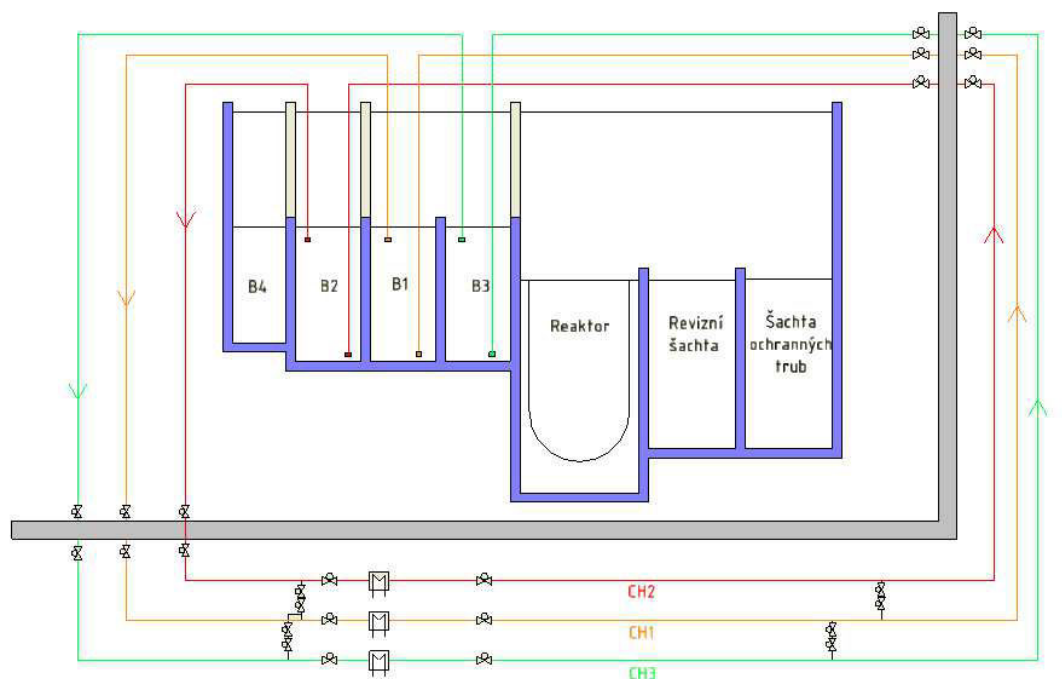
Většina bezpečnostních systémů je zálohována koncepcí 3 x 100 % (mimo sací a výtlačná potrubí, která navazují na jednotlivé sekce BSVP včetně oddělovacích rychločinných armatur).

Technologický systém chlazení je složen z (viz Obr. 8.4):

- Tří nezávislých okruhů, které se můžou navzájem zastoupit, každý okruh je tvořen vlastním výměníkem, čerpadlem a potrubím s armaturami
- Propojů na výtlaku a sání čerpadel, kde na každém propoji je dvojice uzavíratelných armatur
- Odvodu a přívodu vod do a ze systému čištění vod BSVP (SVO-4) umístěné v BAPP
- Trasy mobilního drenážního čerpadla
- Trasy pro systémy SIPPING OFF-LINE (slouží ke kontrole hermetičnosti palivových souborů)

Vstupy a výstupy potrubních tras z kontejnmentu jsou z každé strany odděleny pneumatickými rychločinnými armaturami (RČA) a jsou zabezpečeny hermetickými průchody.

Výkony jednotlivých okruhů stačí k chlazení plně obsazených sekcí BSVP a ŠTK.



Obr. 8.4 Schéma chlazení bazénu

Kvůli bezpečnosti je sání systému umístěno v takové výšce, aby nikdy nedošlo k úplnému odčerpání chladiva. Jestli by došlo k poruše sání, tak by zde

zůstala vrstva vody, která by neovlivnila bezpečnost. Tuto vodu by bylo možné odčerpávat pouze nainstalováním ponorného čerpadla [39].

Během normálního provozu jsou kontrolovány:

- Výšky hladin v dílčích sekcích.
- Teploty chladiva v jednotlivých zaplněných sekcích.
- Průtok technické vody pracovním chladičem.
- Teplota technické vody důležité na vstupu do reaktorového sálu a na výstupu z pracovního chladiče.
- Průtok na výtlaku pracovního čerpadla.

Jestliže by selhalo chladicí zařízení bazénu, pak by trvalo jeden až deset dní, podle doby chlazení vyhořelého paliva a množství PS, než by došlo k odhalení konců palivových souborů. Jakmile již palivo není chráněno vodou, tak dochází ke ztrátě radiačního stínění, což způsobí problémy se znovuoobením chlazení. Jestli by se palivo dostalo do kontaktu se vzduchem, pak by teplota paliva mohla stoupnout až k 900 °C [40].

## 9 Havarijní dochlazování bazénů s vyhořelým palivem

V této kapitole se zaměříme na dochlazování bazénů s vyhořelým palivem a také na možnosti aplikace materiálu s fázovými přeměnami.

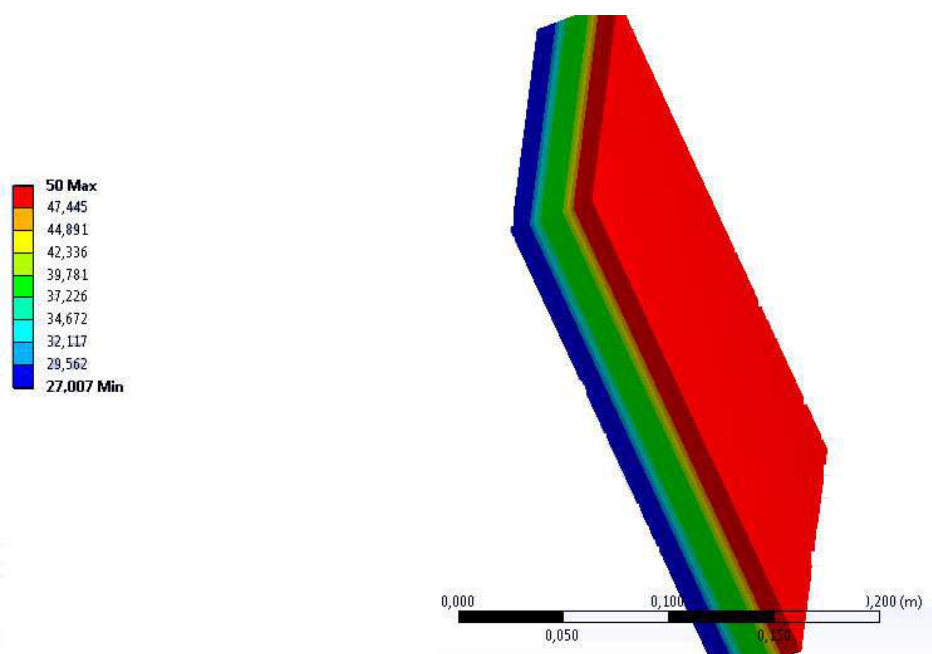
V ustáleném stavu při normálním provozu jsou ztráty přes stěny bazénu uvažovány  $5 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$  (podle měření ve Francii [41]). Tyto ztráty jsou malé, neboť stěny mají velký tepelný odpor a to díky své konstrukci. Jak už bylo zmíněno v podkapitole Chlazení bazénu, stěny jsou tvořeny dvěma vrstvami ocelových plechů tloušťky 8 mm a drenážním betonem. Mezi ocelovými plechy se navíc nachází vzduchová mezera o šířce opět 8 mm.

V programu Ansys jsme použili následující materiály s vlastnostmi při teplotě  $50^\circ\text{C}$ :

	Měrná tepelná kapacita [J/kg K]	Hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]	Tepelná vodivost [W/m K]
Ocel tř. 17	434	7 850	16,4
Ocel tř. 11	469	7 850	54,5
Drenážní beton	780	2 300	0,003
Vzduch	1 905	1,092	0,0262

Tab. 9.1 Vlastnosti použitých materiálů

Pak simulace proudění tepla stěnou za normálních provozních podmínek je znázorněna na Obr. 9.1:



Obr. 9.1 Rozložení teplot při normálním stavu skrz stěnu BSVP

## 9.1 Nechlazený bazén

U nechlazeného bazénu budeme předpokládat, že jsou všechna místa (tzv. „hnízda“) plně obsazena a k vyřazení chladicích smyček dojde současně.

Nyní vypočítáme, za jak dlouho by voda začala vřít, pokud by všechen zbytkový výkon palivových souborů šel do vody. Budeme předpokládat, že k výpadku dojde při výměně paliva, kdy objem vody je  $V = 1\,198\text{ m}^3$ .

Množství tepla, které voda přijme v rozmezí teplot  $t_1 = 50\text{ °C}$  a  $t_2 = 100\text{ °C}$  lze vypočítat podle rovnice (4.1)

$$Q = V\rho c_p(t_2 - t_1), \quad 9.1$$

kde  $V$  je objem vody v bazénu ( $V = 1\,198\text{ m}^3$ );

$\rho$  je hustota vody ( $\rho = 988\text{ kg/m}^3$ )

$c_p$  je měrná tepelná kapacita, vypočítána pomocí X-steamu ( $c_p = 4,179\text{ kJ/kg °C}$ );

$t_1, t_2$  označují počáteční a koncové teploty ( $t_1 = 50\text{ °C}$ ,  $t_2 = 100\text{ °C}$ ).

Pak po dosazení hodnot do rovnice (9.1) dostáváme:

$$\begin{aligned} Q_{H_2O} &= V\rho c_p(t_2 - t_1) = 1\,198 \cdot 988 \cdot 4,179 \cdot 10^3 \cdot (100 - 50) \\ &= 2,47 \cdot 10^{11}\text{ J}, \end{aligned} \quad 9.2$$

Nyní vypočítáme celkový výkon, který produkují palivové soubory. Z dostupných informací víme, že zbytkový výkon jednoho palivového souboru je  $1,2\text{ kW}$  [32], budeme počítat plně zaplněný BSVP, tzn. uvažujeme 705 palivových souborů (JE Temelín). Pak celkový zbytkový výkon bude roven:

$$P_{celk} = P_{PS} \cdot n = 1\,200 \cdot 705 = 8,46 \cdot 10^5\text{ W}. \quad 9.3$$

Poté doba, za kterou se zvýší teplota v bazénu z  $50\text{ °C}$  na  $100\text{ °C}$ , lze vypočítat následovně:

$$\tau_s = \frac{Q_{H_2O}}{P_{celk}} = \frac{2,47 \cdot 10^{11}}{8,46 \cdot 10^5} = 292\,394\text{ s} = 3,4\text{ dní}. \quad 9.4$$

Pak jestliže by došlo k vyřazení chladicích okruhů během nominálního provozu, tzn. obsah vody  $V = 608\text{ m}^3$  a opět při maximálním obsazení hnízd, došlo by k varu zhruba za poloviční dobu jako při výměně paliva.

Pro simulaci v programu Ansys budeme pro zjednodušení uvažovat bazén válcového tvaru o průměru 4 m, se stěnou složenou z jednotlivých materiálů (viz Tab. 9.1). Budeme postupovat následovně:

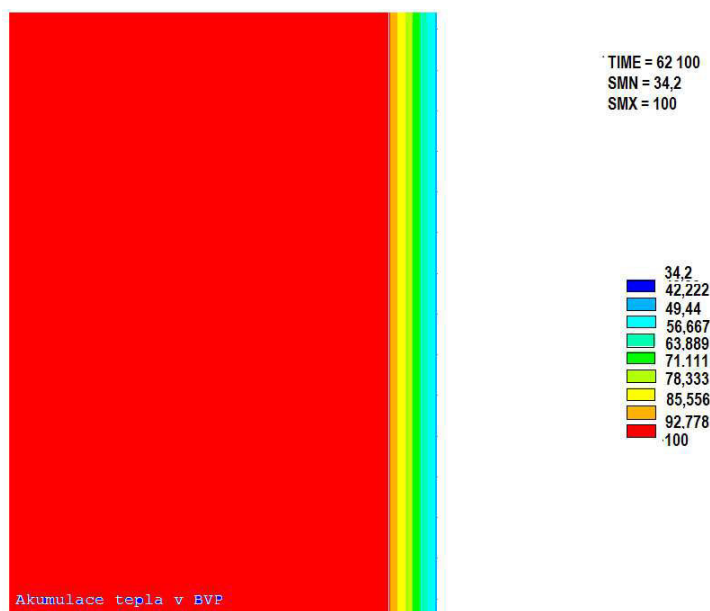
1. Nejdříve si zvolíme nestacionární proudění tepla
2. Vytvoříme si model, pro který zvolíme typ Plane 55 (Používá se pro prvky s osovou souměrností s dvou-dimenzionálním vedením tepla).
3. Určíme si vlastnosti použitých prvků
  - Tab. 9.1
  - voda – tepelná vodivost 0,679 W/m K a entalpie je uvedena v Tab. 9.2.

Teplota [°C]	Entalpie [J/kg]
0	$7,88 \cdot 10^{-31}$
100	$4,001 \cdot 10^8$
101	$2,56 \cdot 10^{11}$

Tab. 9.2 Entalpie vody

4. Nastavíme teplotu vody v bazénu aby stoupala z 50 °C na 100 °C, a to způsobem, že nastavíme do vody výkon, který generují palivové soubory  $P_{\text{celk}}$ . Jakmile teplota vody dosáhne 101 °C, úloha začne divergovat a přestane běžet.
5. Pak už jen načteme předposlední krok, neboli krok kdy voda dosáhla 100 °C.

Pak výsledná simulace rozložení teplot ve stěně bude vypadat následovně:



## 9.2 Chlazený bazén

Nyní se zaměříme na případ, kdy kolem stěn bazénu bude PCM materiál, přesněji parafín RT 58.

Budeme uvažovat bazén o rozměrech 16 x 9 x 11,5 (JE Temelín) s tím, že kolem bazénu bude vrstva parafínu o tloušťce 0,5 m. Pak objem parafínu  $V = 813 \text{ m}^3$ .

Po dosazení do rovnice (4.2) dostáváme teplo  $Q$  o velikosti:

$$\begin{aligned} Q_{PCM} &= \rho_{PCM,t} V c_{PCM,t} (t_z - t_1) + \rho_{PCM,t} V l_{PCM} \\ &\quad + \rho_{PCM,k} V c_{PCM,k} (t_2 - t_z) = \\ &= 880 \cdot 813 \cdot 2000 (58 - 50) + 880 \cdot 813 (268\,000 - 20\,000) + \\ &\quad 770 \cdot 813 \cdot 2000 (100 - 58) = 20,38 \cdot 10^{13} \text{ J}, \end{aligned} \quad 9.5$$

kde  $\rho_{PCM,t}$  je hustota PCM v tuhé fázi ( $\rho_{PCM,t} = 880 \text{ kg/m}^3$ );

$\rho_{PCM,k}$  označuje hustotu PCM v kapalném stavu ( $\rho_{PCM,k} = 770 \text{ kg/m}^3$ );

$c_{PCM}$  je měrná tepelná kapacita ( $c_{PCM} = 2000 \text{ J/kg K}$ );

$t_1$  značí počáteční teplotu ( $t_1 = 50 \text{ °C}$ ) a naopak  $t_2$  koncovou teplotu ( $t_2 = 100 \text{ °C}$ );

$t_z$  označuje teplotu, při které dochází k fázové přeměně ( $t_z = 58 \text{ °C}$ )

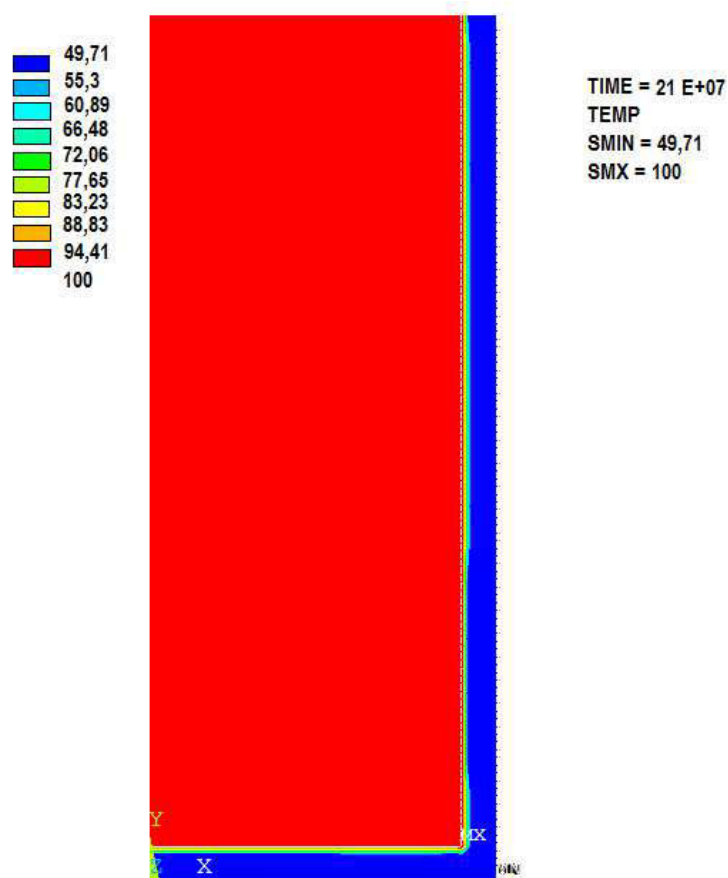
Pak výpočet, za jak dlouho by došlo k roztátí celého objemu parafínu, bude vypadat následovně:

$$\tau = \frac{Q_{PCM} + Q_{H_2O}}{P_{celk}} = \frac{2,38 \cdot 10^{13} + 2,47 \cdot 10^{11}}{8,46 \cdot 10^5} = 2,85 \cdot 10^7 \text{ s} = 329 \text{ dní} \quad 9.6$$

Při modelování problému pomocí programu Ansys, se bude postupovat podobně jako v případě nechlazeného bazénu (stejně body postupu 1. – 4.). Jen kolem bazénu vytvoříme vrstvu parafínu o tloušťce 0,5 m, s vlastnostmi entalpie z Tab. 4.3 a tepelnou vodivost  $0,2 \text{ W/m K}$ .

Jakmile voda dosáhne  $101 \text{ °C}$ , začne divergovat a přestane běžet. V dalším kroku tuto úlohu restartujeme, vybereme všechny body vody a nastavíme do nich teplotu  $100 \text{ °C}$  a necháme běžet po zvolenou dobu ( $21 \cdot 10^7 \text{ s}$ ). Pak výsledek řešení jde vidět na Obr. 9.2.





Obr. 9.2 Modelace akumulace tepla parafínem po 48 hodinách

Mezi největší nevýhody tohoto umístění parafínu je potřebný prostor, který není v současných elektrárnách k dispozici.

Proto se americká univerzita zabývá možností aplikace parafínu, které by bylo možno aplikovat v nynějších jaderných elektrárnách, v tzv. „žaluziovém“ provedení, které by bylo situováno nad bazénem s vyhořelým palivem. Jednalo by se o bloky naplněné parafínem, které by se daly shrnout ke stěně bazénu, aby se mohlo pracovat s palivovými soubory.

## **10 Posouzení technických návrhů z pohledu jaderné bezpečnosti**

### **Ledový kontejnment**

- Řešení rizika vývoje vodíku

- Jestliže by došlo k těžké havárii, bylo nainstalováno ovládání otevírání dvířek ledového kondenzátoru. Tím by došlo k přirozené cirkulaci, díky které je horní polovina kontejnmentu využita k promíchávání např. v JE Loviisa jsou nainstalovány mechanismy na otevírání prostředních a horních dvířek, které se otevírají během odstávky. Tento mechanismus pracuje na principu dusíkových válců. Otevření dvířek se spustí, i jakmile teplota na výstupu z aktivní zóny stoupne na 450 °C.
- Dále by měl být v kontejnmentu nainstalován pasivní autokatalytický rekombinátor.
- Ve spodních boxech kontejnmentu by měla být možnost řízeného spalování.

- Vnější chlazení ocelové obálky

- Kontejnment s ledovým kondenzátorem tvoří dvě obálky, vnitřní a vnější. Vnitřní kontejnment je ocelová obálka, kterou lze zevnějšku chladit v případě vzniku havárie. Uvádí se, že sprchový systém je schopný odvádět tepelný výkon 3 MW a je spouštěn, jestliže tlak v kontejnmentu dosáhne projektovaného přetlaku a to 0,17 MPa.

### **Parafínový kondenzátor**

- U parafínového kondenzátoru odpadá nebezpečí zatopení spodních prostor, neboť parafín bude uzavřen v kondenzátoru a nebude nikam odtékat. Do spodního boxu tedy bude stékat jen zkondenzovaná pára, která bude odtud, podle potřeby, čerpána do sprchového systému.

O použité jaderné palivo se musí postarat provozovatel (podle Atomového zákona). Ten se musí postarat o veškeré náklady spojené s manipulací, uložením a i zabezpečením úložišť. O bezpečné ukládání RAO se v České republice stará Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO), tato organizace je financována z tzv. jaderného účtu (uložení 50 Kč za každou vyrobenou MWh).

### **Poruchy BSVP**

V systému chlazení BSVP může dojít k různým poruchám, které by mohly ovlivnit jeho provoz. Proto jsou chladicí okruhy zálohovány 3 x 100 %.

Mezi takové poruchy může například patřit snižování hladiny vody a tím pádem i zahřívání systému. Příčinou úbytku chladicí směsi může být netěsnost potrubí, porucha čerpadla či porušení stěny BSVP.

Jestliže by došlo k výraznému snížení hladiny natolik, že by klesla pod horní okraj sacího potrubí, mohlo by dojít ke zavzdušnění výměníku.

Mezi další poruchy může patřit:

- Vysoká vstupní teplota nebo nízký průtok přes provozovaný výměník.
- Zanesení teplosměnné plochy výměníku úsadami nebo produkty koroze materiálů[42]

## 11 Závěr

Diplomová práce se v úvodní části zabývá jadernou bezpečností, popisem průběhu havárií LOCA a rozdělení kontejnmentů. Důraz je kladen na kontejnment s ledovým kondenzátorem, pro který hledáme alternativní řešení.

V dalších kapitolách se práce zabývá výběrem demonstrační látky, která by mohla plnohodnotně nahradit led, konstrukcí parafinového kondenzátoru a hlavně kondenzací.

Zde jsme porovnávali vertikální kondenzátory, souproudé a protiproudé. Přestože by byly vhodnější horizontální kondenzátory, avšak vzhledem k omezeným prostorům a nutnému odvodu zkondenzované kapaliny jsme zvolili vertikální.

Při výpočtu vertikálních kondenzátorů nám vyšly souproudé jako výhodnější (vyšší koeficient přestupu tepla) než protiproudé, což může být způsobeno tím, že pára proudící směrem vzhůru zpomaluje stékající film (brzdí jen smykové napětí stoupající páry).

K podobným výsledkům se dospělo i při výpočtu množství zkondenzované páry a doby, za jak dlouho dojde ke zkondenzování veškeré vzniklé páry. Zde vyšlo, že při souproudé kondenzaci by došlo zkapalnění veškeré páry za 9 s.

Druhá část diplomové práce se zabývá skladováním vyhořelého paliva, jeho bezpečností a hlavně uložením v bazénu s vyhořelým palivem.

Bazény s vyhořelým palivem lze dělit podle jejich umístění, zde jsou situovány uvnitř nebo vně reaktorového sálu.

Jestliže dojde k vyřazení chladicích okruhů, začne se bazén zahřívat, podle výpočtů nám vyšlo, že než by voda došla k bodu varu, by trvalo zhruba den. Aby se tento časový interval prodloužil, byl využit parafín k akumulaci vzniklého tepla, podle propočtů by se tento interval prodloužil asi o 96 dnů. Což dává dostatečnou časovou rezervu k obnově chlazení bazénu s vyhořelým palivem.

Avšak díky svým rozměrům nelze tento způsob akumulace instalovat v současných jaderných elektrárnách, kde na ně není místo.

## 12 Zdroje

- 1] „SUJB,“ [Online]. Available: <http://www.sujb.cz/o-sujb/uvod/>. [Přístup získán 5. 3. 2013].
- 2] „SUJB,“ [Online]. Available: [http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/G2-EF-final\\_udalosti\\_a\\_rizika\\_PUBLIKACE.pdf](http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/G2-EF-final_udalosti_a_rizika_PUBLIKACE.pdf). [Přístup získán 11. 5. 2013].
- 3] Z. Pluške, Možnosti zvyšování jaderné bezpečnosti pro koncept pasivního systému s ledními kondenzátory v případě LOCA havárie (Diplomová práce), Brno, 2011.
- 4] „FRG,“ [Online]. Available: [http://www.frg.wz.cz/Jaderna%20fyzika/4\\_4%20Jaderna%20energetika.htm](http://www.frg.wz.cz/Jaderna%20fyzika/4_4%20Jaderna%20energetika.htm). [Přístup získán 1 5 2013].
- 5] „CEZ,“ [Online]. Available: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/zvazovana-dostavba-elektrarny-temelin/bezpecnost.html>. [Přístup získán 10. 2. 2013].
- 6] „NUC,“ [Online]. Available: [www.nuc.elf.stuba.sk/lit/BAS/web/PSAcv.pps](http://www.nuc.elf.stuba.sk/lit/BAS/web/PSAcv.pps). [Přístup získán 11 5 2013].
- 7] R. Hinc, „Probabilistic Safety Assessment PSA,“ [Online]. Available: [www.nuc.elf.stuba.sk/lit/BAS/web/PSAcv.pps](http://www.nuc.elf.stuba.sk/lit/BAS/web/PSAcv.pps). [Přístup získán 11. 5. 2013].
- 8] L. Gajdzica, *Analýza možností užití III. a IV. generace jaderných reaktorů v ČR*, BRNO, 2010.
- 9] O. Matal a H. Šen, *Jaderná zařízení a jejich bezpečnost*, Brno: Akademické nakladatelství CERM, říjen 2011.
- 10] „3POL,“ [Online]. Available: <http://3pol.cz/1272-co-vydrzi-kontejnment-jaderne-elektrarny>. [Přístup získán 10 11 2012].
- 11] „Johnston Analytics,“ [Online]. Available: <http://johnstonanalytics.com/energy/nuclear>. [Přístup získán 11 5 2013].
- 12] „Industrial cards,“ [Online]. Available: <http://www.industcards.com/>. [Přístup získán 11. 5. 2013].
- 13] G. A. Greene, *Heat Transfer in Nuclear Safety*, San Diego: Academic Press, 1997.
- 14] W. G. Taft a e. al, „Nuclear Reactor Condenser Support Structurs“. U.S. Patent 3 726 759, 29. 4. 1973.
- 15] „Testovani energetických systému,“ [Online]. Available: <http://www.tesnet.cz/cs/reference.php>. [Přístup získán 11. 5. 2013].
- 16] „NCI,“ [Online]. Available: <http://www.nci.org/e/el-ice-condensers.htm>. [Přístup získán 30 10 2012].
- 17] „Umweltbundesamt,“ [Online]. Available: 5. <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltthemen/kernenergie/teme>

- lin/Melk/GesamtUVP/UVPDokumentation/etegesamtdoku3\_cz.pdf. [Přístup získán 30. 10. 2012].
- J. Martinec, „Klasifikace kontejnmentů (přednáška)“.
- 18]
- M. Kabrhel, Akumulace tepla (Habilitační práce), Praha.
- 19]
- „Technická zařízení budov,“ [Online]. Available: <http://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/7360-pcm-ve-stavebnictvi-dil-1-zakladni-charakteristiky-pcm>. [Přístup získán 11. 5. 2013].
- 20]
- B. Zalba a M. J. Marín, „Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications,“ 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431102001928>. [Přístup získán 12. 10. 2012].
- 21]
- F. Agyenim a N. Hewitt, „A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage system,“ 2010. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002469>. [Přístup získán 15. 10. 2012].
- 22]
- „RubiTherm,“ [Online]. Available: <http://www.rubitherm.com/english/index.htm>. [Přístup získán 5. 10. 2012].
- 23]
- M. Jícha, Přenos tepla a látky, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2001.
- 24]
- „ČEZ a.s.,“ [Online]. Available: <http://www.cez.cz/>. [Přístup získán 14. 5. 2013].
- 25]
- N. E. Todreas a S. K. Mujid, Nuclear System I: Thermal Hydraulic Fundamentals, Massachusetts: Taylor and Francis, 1993.
- 26]
- „Westinghouse Nuclear,“ 2007. [Online]. Available: [http://www.westinghousenuclear.com/docs/AP1000\\_brochure.pdf](http://www.westinghousenuclear.com/docs/AP1000_brochure.pdf). [Přístup získán 12. 5. 2013].
- 27]
- G. J. Collier a R. J. Thome, Convective boiling and condensation, 28] Oxford: Clarendon press, 1996.
- I. Kotcioglu a A. Y. Uyarel, An approach to heat and mass transfer analysis during film condensation inside a vertical tube, USA: Pergamon Press, 1993.
- 29]
- S. Mostafa, Two Phase Flow, Boiling and Condensation.
- 30]
- M. Jícha, Přenos tepla a látky, Brno: Akademické nakladatelství CERM, 31] 2001.
- F. Tesař, Odvod tepla a vývin tepla vyhořelého jaderného paliva v 32] úložištích (Diplomová práce), Brno, 2011.

- 33] *Systém chlazení BSVP (Provozní předpisy JETE).*  
„Democratic Undergrounf,“ [Online]. Available:  
34] [http://www.democraticunderground.com/discuss/duboard.php?az=view\\_all&address=439x643474](http://www.democraticunderground.com/discuss/duboard.php?az=view_all&address=439x643474) . [Přístup získán 25. 3. 2013].
- O. Burian, Valiace CFD modelu bazénu skladování vyhořelého paliva na  
35] základě měřených dat (Diplomová práce), Praha, 2012.
- J. Škorpík, „Transformační technologie,“ [Online]. Available:  
36] <http://www.transformacni-technologie.cz/jaderna-energetika.html>. [Přístup získán 29. 3. 2013].
- „SUJB,“ [Online]. Available:  
37] [http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/narodni\\_zpravy/NZ\\_VP\\_RAO\\_2\\_3\\_CZ.pdf](http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/narodni_zpravy/NZ_VP_RAO_2_3_CZ.pdf). [Přístup získán 20. 1. 2013].
- F. Tesař, Odvod tepla a vývin tepla vyhořelého paliva v úložištích  
38] (Diplomová práce), Brno, 2011.
- „United States Nuclear Regulatory Commission,“ [Online]. Available:  
39] <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr0933/sec3/082r3.html>. [Přístup získán 10. 2. 2013].
- R. Alvarez, Reducing the Hazard from Stored Power-Reactor Fuel in the  
40] United States Science & Global Security, 2003.
- P. Aude, M. Sakiz a I. Rupp, Numerical Simulation of the Restart  
41] Cooling System in a Storage Pool Under Boiling COnditions, ICAP, 2007.
- ČEZ-ETE, „Popisy postupů svazku 1TC006/3 - Poruchy odvodu z AZ v  
42] režimu 5 nebo 6 a poruchy chlazení BSVP,“ 2000, p. 101/130.
- „Jaderná bezpečnost,“ [Online]. Available: [http://www.jaderna-](http://www.jaderna-bezpecnost.cz/bezpecnost-jaderneho-reaktoru.htm)  
43] [bezpecnost.cz/bezpecnost-jaderneho-reaktoru.htm](http://www.jaderna-bezpecnost.cz/bezpecnost-jaderneho-reaktoru.htm) . [Přístup získán 29 10 2013].
- „Science direct,“ [Online]. Available:  
44] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700702001627?np=y>.  
[Přístup získán 15 4 2013].

**Seznam použitých zkratk**

AZ	Aktivní zóna
AGR	Advanced gas cooled
BAPP	Budova aktivních pomocných provozů
BSVP	Bazén skladování vyhořelého paliva
BWR	Boiling Water Reactor
ECCS	Emergency core cooling system
LB LOCA	Large Break Loss of coolant accident
LOCA	Loss of coolant Accident
MAAE	Mezinárodní agentura pro jadernou bezpečnost
PCM	Phase change material (Materiál s fázovou přeměnou)
PS	Palivový soubor
PWR	Pressurized water reactor
RČA	Rychločinná armatura
RBMK	Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj
SVO-4	Systém čištění vod BSVP
ŠTK	Šachta technické kontroly
VJP	Vyhořelé jaderné palivo
VP	Vyhořelé palivo
VVER	Vodo - vodní energetický reakt
ŽP	životní prostředí



## 13 Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Název
$c$	[J/kg K]	měrná tepelná kapacita
$c_{PCM,k}$	[J/kg K]	měrná tepelná kapacita v kapalném stavu
$c_{PCM,t}$	[J/kg K]	měrná tepelná kapacita v tuhém stavu
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	gravitační zrychlení
$i_{wp1}$	[J/kg]	entalpie nasycené kapaliny při tlaku $p_p$
$i_{f2}$	[J/kg]	entalpie nasycené kapaliny při teplotě $t_2$
$i_{fg2}$	[J/kg]	entalpie nasycené páry při teplotě $t_2$
$i_{wa1}$	[J/kg]	entalpie nasycené kapaliny při $t_2$ a $p_{w1}$
$i_{fg}$	[J/kg]	latentní teplo
$L$	[m]	délka kondenzátoru
$l_{PCM}$	[J/kg]	měrné skupenské teplo
$m_{w1}$	[kg]	hmotnost vody na počátku
$m_{wp}$	[kg]	hmotnost chladiva v primárního systému
$m_w$	[kg]	celková hmotnost páry
$Nu_{hor}$	[-]	Nusseltovo číslo horizon. kondenzátoru
$Nu_{ver}$	[-]	Nusseltovo číslo vertikálního kondenzátoru
$p$	[Pa]	tlak
$p_{a1}$	[Pa]	parciální tlak vzduchu na konci LOCA
$p_t$	[Pa]	tlak otevření samovýklopních dvěří
$p_1$	[Pa]	počáteční tlak v kontejnmentu
$p_{w1}$	[Pa]	parciální tlak vypařené vody
$Pr$	[-]	Prandtlovo číslo
$Q$	[J]	teplo
$R_a$	[J/mol K]	plynová konstanta
$Re$	[-]	Reynoldsovo číslo
$t_1$	[°C]	teplota na začátku akumulace tepla
$t_2$	[°C]	teplota na konci akumulace tepla
$t_p$	[°C]	teplota chladiva v primárním potrubí
$t_{sat}$	[°C]	teplota saturace
$t_{stř}$	[°C]	střední teplota
$t_w$	[°C]	teplota stěny
$t_z$	[°C]	teplota, při které změně skupenství
$V$	[m <sup>3</sup> ]	objem
$V_c$	[m <sup>3</sup> ]	objem kontejnmentu
$V_p$	[m <sup>3</sup> ]	objem primárního potrubí
$V_t$	[m <sup>3</sup> ]	objem celkový
$v_{f2}$	[m <sup>3</sup> /kg]	měrný objem nasycené kapaliny
$v_{fg2}$	[m <sup>3</sup> /kg]	měrný objem páry
$v_{w1}$	[m <sup>3</sup> /kg]	měrný objem přehřáté páry
$v_{wp}$	[m <sup>3</sup> /kg]	měrný objem primárního systému
$x$	[-]	suchost
$v$	[m]	rychlost padajícího filmu

Řecká písmena

$\alpha$	[W/m <sup>2</sup> K]	koeficient přestupu tepla
$\lambda_f$	[W/m K]	tepelná vodivost
$\delta$	[m]	tloušťka filmu
$\mu_f$	[Pa/s]	dynamická viskozita
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota
$\rho_f$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota filmu
$\rho_g$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota páry
$\rho_{PCM,t}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota PCM látky v tuhém stavu
$\rho_{PCM,k}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota PCM látky v kapalném stavu
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	kinematická viskozita
$\phi$	[-]	relativní vlhkost

## 14 Přílohy

### Příloha I

#### 6. Engineered Safety Features

#### AP1000 Design Control Document

Table 6.2.1.1-1 SUMMARY OF CALCULATED PRESSURES AND TEMPERATURES			
Break	Peak Pressure (psig)	Available <sup>1</sup> Margin (psi)	Peak Temperature (°F)
Double-ended hot leg guillotine	50.0	9.0	416.5
Double-ended cold leg guillotine	57.8	1.2	284.9
Full main steamline DER, 30% power, MSIV failure	57.3	1.7	373.9
Full main steamline DER, 101% power, MSIV failure	53.7	5.3	375.3

**Note:**

1. Design Pressure is 59 psig

Table 6.2.1.1-2 INITIAL CONDITIONS	
Internal Temperature (°F)	120
Pressure (psia)	15.7
Relative Humidity (%)	0
Net Free Volume (ft <sup>3</sup> )	2.06E+06
External Temperature (°F)	115 dry bulb 80 wet bulb